جامعة قاصدي مرباح ورقلة

كلية الرياضيات و علوم المادة

قسم الفيزياء

رقم الترتيب :.....

الرقم التسلسلي :.....

السنة الجامعية 2025/2024

أطروحة لنيل شهادة دكتوراه علوم

تخصص : فيزياء

من إعداد : بوعنان رابح

بعنوان

محاكاة الخلايا الكهروضوئية المعرضة للضوء من مركزات الأشعة الشمسية

تمت المناقشة العلنية يوم 30 جوان 2025

أمام اللجنة المكونة من السادة :

بشكي جمال	أستاذ تعليم عالي	جامعة ورقلة	رئيسا
عيادي كمال الدين	أستاذ تعليم عال "	جامعة ورقلة	مشرفا
داودي باحمد	أستاذ تعليم عال	جامعة غرداية	مناقشا
بن طويلة عمر	أستاذ تعليم عال	جامعة ورقلة	مناقشا
سويقات عبد القادر	أستاذ تعليم عال	المدرسة العليا للأساتذة بورقلة	مناقشا
ليتيم فتحي	أستاذ محاضر أ	جامعة الوادي	مناقشا

السنة الجامعية 2025/2024

الإهداء

إلى روح أبي وإلى روح أمي ،

صاحبا الفضل بعد عز وجل في وجودي وفي تعليمي و في نجاحي رحمه الله عليهما .

إلى رفيقة دربي زوجتي الغالية ،

إلى أبنائي وبناتي الأعزاء

الى جميع **أفراد عائلتي**

إلى كل الأساتذة و الرفقاء و الزملاء بجامعة ورقلة

الى روح معلمي وأستاذي

محمد عباز دوادي رحمه الله

أهدي هذا العمل المتواضع

الشكر والتقدير

الحمد لله الذي وفقني لإتمام هذا العمل، فله كل الحمد و الشكر.

وأغتنم هذه الفرصة **لأتقدم** ببالغ الشكر و الامتنان

لكل من أستاذي المشرف علي دوما وعلى أعمالي الأستاذ الفاضل :

البروفسور كمال الدين عيادي و اشكر أعضاء لجنة المناقشة على قبولهم مناقشة هذا العمل.

كما أعرب عن تقديري العميق لكل من ساعدني من قريب **أو** من بعيد في انجاز هذا العمل و أخص بالذكر البروفيسور **محمد البارسودلي و الأستاذ** راشدي محمد ياسين .

والشكر موصول أيضا **إلى** فريق العمل بكلية الرياضيات و علوم المادة

كل باسمه ورتبته و مقامه وعلى رأسهم السيد عميد الكلية

البروفيسور بشكي جمال .

.. شكرا لكم جميعا

فهرس المحتويات

الإهداء	--
التشكرات	--
قائمة الرموز و الاختصارات	--
المقدمة العامة	VI-I
الفصل الأول : الإشعاع الشمسي	4
مقدمة	5
الإشعاع الشمسي	6
ثابت الشمسي	8
أنواع الإشعاع الشمسي	7
توازن الطاقة في الأرض	11
أهم الزوايا الشمسية :	12
أجهزة قياس الإشعاع الشمسي	20
الإشعاع الشمسي و العوامل الجوية لمنطقة ورقلة (الجزائر)	22
قياسات العوامل الجوية و الإشعاع الشمسي	30
ا الفصل الثاني : الإشعاع الشمسي و المركزات الشمسية	33
مقدمة	33
استخدامات الطاقة الشمسية	34
الخلايا الشمسية و الألواح الشمسية	35
الخلايا الشمسية المتطورة	41
نموذج لخصائص صناعية للوح كهروشمسي مصنوع محليا	42
أنواع المركزات	43
المكونات الأساسية لـ :(PTC)	46
هندسة المجمعات الشمسية الأسطوانية ذي القطع لمكافئ(PTC):	48
المردود (Optical Efficiency)	51
أنظمة تتبع المركز الأسطواني ذي القطع المكافئ(PTC)	52
النمذجة الحرارية(Thermal Modeling)	55

التخزين الحراري(Thermal Energy Storage)	60
الفصل الثالث : نظام التهجين الكهروضوئي – تركيز شمسي - حراري	64
مقدمة	65
تعريف المبادلات الحرارية	66
تصنيف المبادلات الحرارية	70
أنواع أنظمة التهجين	**70**
مجمعات المياه PV/T	73
مجمعات الهواء PV/T	74
نظام تسخين المياه ذو اللوح المسطح الحراري N-PVT-FPC	76
نظام تسخين الهواء ذو اللوح المسطح الحراري N-PVT-FPC	77
نظام الحراري الضوئي المتكامل (BiPVT):	80
المبادلات الحرارية ذات الأنبوب المزدوج	82
كفاءة نظام التهجين	87
مقارنة أداء السوائل والهواء	89
الفصل الرابع:النمذجة الرياضية للنظام المدروس	90
مركز الأشعة ذي القطع المكافئ الأسطواني(PTC)	91
النظام الكهروشمسي العادي	94
الدراسة الضوئية	95
النمذجة الرياضية للخلية الشمسية(PV)	96
كفاءة الخلية الكهروضوئية	97
المحاكاة التجريبية للنموذج المصغّر	98
الطرائق والأساليب لنمذجة النظام (PTCV) المدروس	103
الدراسة الحرارية للنظام(PVCT)	104
الفصل الخامس : تحليل ومناقشة النتائج	**110**
خاصية الإشعاع الشمسي لمنطقة ورقلة	112
الخاصية I-V	114
الخاصية P-V	118
الخاصية P(t)	120

المردود الكهربائي للنظام	122
الطاقة الحرارية النظام الهجين	124
درجة حرارة المائع في النظام الهجين	124
الحصيلة الطاقوية للنظام الهجين	127
تخفيض درجة حرارة الخلايا الكهروشمسية في النظام الهجين	129
تحسين المردود الكهربائي	131
الخاتمة	136
الملخصات	139
الملحقات	142

رقم الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
1–1	أبعاد وموضع الشمس والأرض.	05
2–1	توزيع طيف الإشعاع الشمسي	07
3–1	التوزيع الطيفي للإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي للأرض	08
4–1	تغير الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي على مدار السنة	09
5–1	يوضح أنواع الإشعاع الشمسي الرئيسية	11
6–1	:حركة الأرض بالنسبة للشمس.	12
7–1	بيان تغيرات زاوية الميل شمسي خلال أيام السنة.	13
8–1	الزوايا الشمسية (z,a,h)	16
9–1	زاوية الساعة الشمسية ودائرة خط العرض	17
10–1	مختلف أجهزة قياس شدة الإشعاع الشمسي	21
11–1	منحنيات درجات الحرارة الدنيا و القصوى	23
12–1	عدد ساعات التشميس لأيام شهر جانفي و شهر جويلية	25
13–1	قياسات الإشعاع الشمسي ليوم كامل بمنطقة ورقلة (موقع الارصاد الجوي	25
14–1	متوسط الإشعاع الشمسي المتوسط لشهر جانفي	26
15–1	متوسط الإشعاع الشمسي المتوسط لشهر جويلية	27
1–2	مخطط استخدامات الطاقة الشمسية	36
2–2	خلايا أحادية البلورة و متعددة البلورات	37
3–2	الخلايا ذات الفيلم الرقيق	38
4–2	الخلايا الشمسية من البيروفسكايت	38
5–2	الألواح الشمسية الأحادية البلورة	39
6–2	الألواح الشمسية ذات نصف الخلية	40

7–2	اللوح الكهروشمسي المصنوع محليا.بمؤسسة زرقون بورقلة	42
8–2	مركزات البرج الشمسي	43
9–2	نظام صحن قطع مكافئ	44
10–2	مركزات أشعة فرينل	45
11–2	المجمع الشمسي الأسطواني القطع مكافئ	46
12–2	مخطط الPTC	48
13–2	زاوية الحافة وزاوية القبول للPTC	49
14–2	تتبع شمسي(شرق_ غرب)لمركز قطع مكافئ أسطواني	53
15–2	تتبع شمسي شمال _جنوب لمركز قطع مكافئ أسطواني	53
16–2	تتبع شمسي شرق _غرب قطبي لمركز قطع مكافئ أسطواني	54
1–3	شكل يوضح مبدأ عمل جهاز تهجين	67
2–3	أنواع المجمعات PV/Tالمختلفة:الصحيفة والأنبوب (a)والقناة(b)والتدفق الحر(c)والممتص المزدوج(d).[	71
3–3	مقارنة بين أنظمة PV/Tالكهرضوئية والحرارية الهجينة	72
4–3	رسم تخطيطي لمجمع تركيزيPV/T	72
5–3	رسم تخطيطي يوضح مجمع مياه هجين (PV/T	73
6–3	يوضح مجمع الهواءPV/Tالهجين مع(a)تصميم نفاث مؤثرو(b)تصميم مموج على شكل حرف V	74
7–3	رسم تخطيطي لمجمع الهواء حيث (a) عرض المقطع العرضي (b) عرض الانفجار(c) عرض الصفيف	75
8–3	شكل(a)المنظر الأمامي (b)المنظر الجانبي لمجمعات Nالحرارية الكهروضوئية المغطاة جزئيا(جزء Iower)(PVT)المتصلة على التسلسل	77
9–3	شكل يوضح تصنيف سخانات الهواء الشمسية المختلفة ومكوناتها	78

a 10–3	المركزات المكافئة للمركب الحراري N–PVT–CPCمتصلة على التسلسل	79
b10–3	مظهر جانبي للمركزات المكافئة للمركب الحراري –N–PVT CPCمتصلة على التسلسل	79
11–3	يوضح تصنيف أنظمة BiPVT	81
12–3	رسم يوضح مختلف التكوينات لمجمع هجين من PV/T	84
13–3	شكل يوضح أبعاد مجمع حراري تقليدي	85
1–4	أبعاد PTC	92
2–4	مخطط نموذج PTC	92
3–4	زاوية الحافة لـ PTC	93
4–4	نماذج PTC مصغرة لمحاكاة تجريبية	93
5–4	خلايا كهر وشمسية مصغرة لمحاكاة تجريبية	94
6–4	تسجيلات الإشعاع الشمسي ليوم نموذجي بمنطقة ورقلة	99
7–4	منحنى الإشعاع اليومي ليوم نموذجي	99
4–8–أ	منحنيات المقارنة للاستطاعة الناتجة بالتركيز و بدون تركيز	102
4–8–ب	اعمدة المقارنة للاستطاعة الناتجة بالتركيز و بدون تركيز	102
9–4	منحنى المحصلة الطاقوية للنظام الهجين النموذج التجريبي المصغر	103
10–4	مخطط المماثلة الكهربائية للنظام	107
1–5	) تغير الإشعاع الشمسي بدلالة الزمن ليومي 15جانفي و 15 جويلية	112
2–5	قيم الإشعاع الشمسي التجريبية وقيم المحاكاة لمنطقة ورقلة	113
2–5 –ب	تغير شدة التيار بدلالة الجهد ليوم 15 جانفي	114
3–5	تغير شدة التيار بدلالة الجهد ليوم 15 جويلية	115
4–5	تغير شدة التيار بدلالة الجهد ليوم 15 جانفي بتركيز الاشعة	116
5–5	تغير شدة التيار بدلالة الجهد ليوم 15 جويلية بتركيز الأشعة	117
6–5	الاستطاعة و الجهد بدون تركيز الاشعة ليوم 15 جانفي	118

7–5	تغير الاستطاعة بدلالة الجهد بدون تركيز الاشعة ليوم 15 جويلية	119
5–7– ب	تغير الاستطاعة بدلالة الجهد بتركيز الاشعة ليوم 15 جانفي	119
8–5	تغير الاستطاعة بدلالة الجهد بتركيز الأشعة ليوم 15 جويلية	120
9–5	الاستطاعة الكهربائية المنتجة في الحالة العادية و بالتركيز ليوم 15 جانفي	120
10–5	الاستطاعة الكهربائية المنتجة في الحالة العادية و بالتركيز ليوم 15 جويلية	121
11–5	منحنى المقارنة للاستطاعة الكهربائية المنتجة بالتركز ليومي 15 جانفي و 15 جويلية	121
12–5	المردود الكهربائي ليوم 15 جانفي بدلالة ساعات التشميس	122
13–5	المردود الكهربائي ليوم 15 جويلية بدلالة ساعات التشميس	123
14–5	درجة حرارة المائع المبرد للألواح الشمسية ليوم 15 جانفي	124
15–5	درجة حرارة المائع المبرد للالواح الشمسية ليوم 15جويلية	125
16–5	منحنى الطاقة الحرارية ليوم 15 جانفي	125
17–5	منحنى الطاقة الحرارية ليوم 15 جويلية	126
18–5	منحنى محصلة الطاقة ليوم 15 جانفي	127
19–5	منحنى محصلة الطاقة ليوم 15 جويلية	128
20–5	تأثير سرعة تدفق المائع على مردود النظام ليوم 15جانفي	131
21–5	تأثير سرعة تدفق المائع على مردود النظام ليومي 15جانفي و 15جويلية	132
22–5	تأثير استخدام الموائع الملحية على مردود النظام ليوم 15جويلية	132
23–5	استخدام الموائع النانوبة على مردود النظام ليوم 15جويلية	133

المقدمة العامة

يبذل المجتمع العالمي جهودًا جبارة للانتقال نحو استغلال مصادر الطاقة المستدامة بدلًا من مصادر الطاقة الأحفورية، وذلك ضمن سياسة عالمية للتحول الطاقوي نحو الطاقات النظيفة .برزت الطاقة الشمسية كعنصر محوري في هذا التحول، حيث تُستغل كطاقة حرارية للتسخين أو كطاقة كهروشمسية لإنتاج الكهرباء[1].

تتجه الأبحاث العلمية والدراسات في هذا المجال على إيجاد تقنيات تعمل على تحسين كفاءة الأنظمة الطاقوية وزيادة مردودها، وذلك باستحداث مواد أكثر كفاءة أو تقنيات أكثر فعالية من حيث المردود والتكلفة، مما سرّع في عملية تركيب وتشغيل هذا النوع من المحطات على نطاق واسع[2].

.وعلى الرغم من ذلك، يبقى أداء الألواح الكهروضوئية معتمدًا بشكل كبير على كمية لإشعاع الشمسي المباشر وعدد ساعات التشميس السنوية، ويتأثر بعدة عوامل تخفض من كفاءتها مثل ساعات الظلام، الغبار، درجة الحرارة، والأيام الغائمة .كما تؤثر زوايا السمت ومساحات تركيب الألواح، خاصة في الأسطح والحقول الفلاحية، على هذا الأداء.

لتحسين إدارة الطاقة، تم التوجه في البداية إلى تصميم الأنظمة الهجينة التي تجمع بين الطاقة الشمسية والطاقة الأحفورية بالاقتران مع الشبكات الكهربائية العادية .بعد ذلك، استُخدمت عدة أساليب أخرى لتخزين الطاقة الكهروشمسية في البطاريات أو تحويلها إلى حرارة أو تخزينها في مواد مخصصة لتخزين الطاقة الحرارية[3] .

وفقًا لمخططات وتقارير وكالة الطاقة الدولية (IEA) في سعيها لتطوير التقنيات المستقبلية لتوليد الطاقة الأكثر تأثيراً ، تركز الجهود على تطوير الطاقة الشمسية المركزة (CSP) وعلى تحسين قدرتها على تلبية الطلب على إنتاج الكهرباء والحرارة على مدار العام. [5]،[4] .

وعليه، أصبح التركيز في الوقت الحالي على استحداث تقنيات جديدة تُطبق على أنظمة استغلال الشمس لتوليد الطاقة الشمسية المركزة بشكل مستدام وتخزين الطاقة الحرارية بطرق تدمج المواد متغيرة الطور [6]،[7] [8].

لى الرغم من أن تكنولوجيا الطاقة الشمسية المركزة عالية التكلفة، إلا أنها يمكن أن تحقق عوائد اقتصادية أعلى من التكنولوجيا الكهروضوئية [9].

تمثل أنظمة الطاقة الشمسية المركزة الهجينة الكهروضوئية/الحرارية (PV/T) نهجًا متطورًا لاستخدام الطاقة الشمسية، حيث تدمج التقنيات الكهروضوئية (PV) والحرارية لالتقاط الطاقة الكهربائية والحرارية من الشمس .يعمل هذا التكامل على تعزيز نقاط القوة في كل من الأنظمة الكهروضوئية والحرارية، مما يؤدي إلى زيادة الكفاءة الإجمالية وإنتاجية الطاقة وتقليص الأبعاد والمساحات مقارنة بالأنظمة التقليدية التي تستخدم أيًا من التقنيتين فقط[10].

.تستخدم الأنظمة الكهروضوئية/الحرارية (PV/T) مركزات جامعة ومكثفة للطاقة الشمسية لتركيز ضوء الشمس على سطح كهروضوئي أصغر وعالي الكفاءة، مما يزيد بشكل كبير من إنتاج الكهرباء مع توليد حرارة مفيدة في نفس الوقت .لا تعمل تقنية الجيل المزدوج هذه على زيادة إجمالي الطاقة المنتجة فحسب، بل تعمل أيضًا على تحسين أداء الخلايا الكهروضوئية عن طريق تقليل درجة حرارة التشغيل، وهو عامل هام نظرًا لأن كفاءة الخلايا الكهروضوئية تنخفض مع ارتفاع درجة الحرارة .[11] .

من خلال استخلاص الطاقة الحرارية واستخدامها، يمكن لمثل هذه الأنظمة الكهروضوئية الهجينة توفير الماء الساخن أو تسخين المكان، وإنتاج الماء المقطر بالإضافة إلى الكهرباء .ومنها إنتاج الهيدروجين الأخضر وكذلك تلبية كل الاحتياجات المتعددة للطاقة من خلال تركيب نظام واحد فقط[12]

تعد تقنية المركّز لهذه الأنظمة مفيدة بشكل خاص في التطبيقات التي تكون فيها المساحة محدودة،

حيث تسمح بكثافة طاقة أعلى .من خلال استخدام التصميمات البصرية المتقدمة، مثل أحواض القطع المكافئ وعدسات فرينل، بشكل شائع لتحقيق هذا التركيز[13] .تركز هذه التصميمات أشعة الشمس على جهاز استقبالPV/T ، والذي يتكون عادةً من خلايا كهروضوئية عالية الكفاءة مقترنة بامتصاص حراري، يتم من خلاله نقل الحرارة وتخزينها بكفاءة عالية[12]

تماشى تطوير أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية الهجينة مع أهداف كثيرة، أهمها الحد من انبعاثات الغازات الدفيئة بسبب استعمال الوقود الأحفوري .كما تساهم هذه الأنظمة في التخفيف من تغير المناخ وتعزيز أمن الطاقة ، وتحسين الجدوى الاقتصادية للأنظمة الكهروضوئية، مما يجعلها قادرة على المنافسة بشكل متزايد مع مصادر الطاقة التقليدية [14]

وعليه، يصبح توفير أنظمة الطاقة الكهروضوئية المركزة الهجينة (PV/T) حلًا شاملًا لتحقيق أقصى استفادة من الطاقة الشمسية، والجمع بين توليد الكهرباء والحرارة بطريقة مدمجة وفعالة في العديد من التطبيقات السكنية والتجارية والصناعية، مما يمهد الطريق لمستقبل طاقة أكثر استدامة.

في هذه الأطروحة، تم تصميم وتركيب تجربة مصغرة في أعمال مخبرية تمثلت في نماذج لدراسة تحسين كفاءة ومردود الأنظمة الكهروشمسية من خلال توزيع الخلايا الكهروشمسية على أسطح هندسية مختلفة (مستوية، هرمية، مخروطية، أسطوانية وقطع مكافئ) اعتُمد في هذه الدراسة مركز الأشعة الأسطواني المكافئ ، مقترنًا بمائع لتخزين الحرارة وتبريد الخلايا الموزعة على محور المركز الأسطواني المكافئ، وهذا النموذج المشكل للنظام الكهروشمسي الحراري (النظام الهجينPVCT). وتم إعداد نموذج للمحاكاة العددية لل (PVTC)لحساب الخصائص الكهربائية والحرارية (جهد، تيار، استطاعة كهربائية، طاقة حرارية) في مختلف ساعات الإشعاع اليومية وفي فصلي الشتاء والصيف اللذين يسجل فيهما ذروة الإشعاع الشمسي وكذلك ذروة الارتفاع في درجة الحرارة .وقد تم اختيار يومي 15 جانفي و15 جويلية ..تضمنت هذه

الدراسة خمسة فصول، خُصص الفصل الأول للإشعاع الشمسي وتقدير شدة الإشعاع الذي يصل إلى سطح الأرض خلال الأيام والفصول المخصصة للدراسة وللحسابات في منطقة ورقلة، والزوايا الشمسية والتتبع الشمسي، ومعادلات تقدير شدة الإشعاع وخصائصه من حيث الميول والزوايا.

في الفصل الثاني، تطرقنا للإشعاع الشمسي وطرق استغلالها في التحولات الطاقوية في توليد الكهرباء وإنتاج الحرارة، وكذلك تم شرح لمختلف أنواع المركزات والمجمعات للأشعة الشمسية المخصصة لإنتاج الحرارة وتسخين الموائع وتخزين الطاقة الحرارية .(PTC) ثم شُرحت مختلف مكونات ومعادلات المركز الأسطواني القطع مكافئ الهجين.(PVTC)

كما خُصص الفصل الثالث لدراسة نظام التهجين الكهروضوئي والتركيز الشمسي الحراري (PVCT) من حيث الأبعاد والمعادلات الخاصة بالحسابات الكهروشمسية والحرارية، والتطرق إلى أنواع لمركزات والمجمعات المستعملة في هذا المجال.وبعدها في الفصل الرابع، تم نمذجة النظام المخصص للدراسة والمحاكاة، وهو "النظام الهجين الكهروشمسي الحراريPVCT

الفصل الخامس والأخير كان لمناقشة نتائج المحاكاة والمقارنة بنتائج الأعمال المنجزة، والخلاصة بالاستخدامات الممكنة لمثل هذه التقنية وآفاق استغلاله والجدوى الاقتصادية والتوصيات التي تفتح لنا عدة دراسات أكاديمية للبحث العلمي لتطوير مثل هذه التقنيات مستقبلًا .

المراجع

[1] *Radoslav S. Dimitrov, The Paris Agreement on Climate Change, Global Environmental Politics, vol. 16, no. 3, pp. 1-11, 2016.*

[2] *IEA, Agence Internationale de l'Energie,* Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy*, Paris, France, 2014*

[3] *H. Zhang et al,Stable colloids in molten inorganic salts, Nature, vol. 542, no. 7641, pp. 328–331, 2017.,*

[4] *G. Brinkman et al., Grid Modeling for the SunShot Vision Study, 2012.*

[5] *M. Mehos et al., Concentrating Solar Power Gen3 Demonstration Roadmap, Nrel/Tp-5500-67464, pp. 1–140, 2017.*

[6] *M. Liu et al., Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 53, pp. 1411–1432, 2016.*

[7] *M. Kenisarin, High-temperature phase change materials for thermal energy storage, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, no. 3, pp. 955–970, 2010.*

[8] *M. H. A. J. Khan, Solar power technologies for sustainable electricity generation - A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 55, pp. 414–425, 2016.*

[9] *A. Hussain, S. M. Arif, and M. Aslam, Renewable and Sustainable Energy Reviews journal homepage: www.elsevier.com/locate/rser Emerging, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 71, no. June 2015.*

[10] *C. Zhao et al., Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates, PNAS, vol. 114, no. 35, p. 9331, 2017.*

[11] *S. A. Kalogirou,* Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, Academic Press is an imprint of Elsevier, 2009.*

[12] *T. T. Chow et al., Modeling and application of direct-expansion solar-assisted heat pump for water heating in subtropical Hong Kong, Applied Energy, vol. 87, no. 2, pp. 643-649, February 2010.*

[13] *E. Bellos & C. Tzivanidis, Investigation of a hybrid ORC driven by waste heat and solar energy, Energy Conversion and Management, vol. 156, pp. 427-439, 2018.*

[14] *W. Huang et al., Enhancing the performance of parabolic trough collectors using nanofluids and turbulators,* IDEAS, *2016.*

الفصل الأول
الإشعاع الشمسي

المقدمة

تُواجه الدول النامية حاليًا العديد من تحديات الطاقة، أبرزها: الطلب المتزايد على الطاقة، والمخاوف من ارتفاع أسعار الوقود، بالإضافة إلى إجراءات التكيف مع تغيرات المناخ .ونظرًا لأن إنتاج الطاقة من مصادر متجددة يُعد أحد البدائل التي يمكن أن تعتمد عليها معظم هذه الدول الواقعة ضمن حزام الإشعاع الشمسي.

يُعد الإشعاع الشمسي المباشر مصدرًا رئيسيًا وهامًا للطاقة المتجددة، والذي تتغير شدته وتوزيعه حسب الموقع الجغرافي على سطح الأرض، وحسب التوقيت من اليوم والسنة.[1]

1.1 الإشعاع الشمسي

يُعتبر الإشعاع الشمسي المصدر الرئيسي للطاقة في الغلاف الجوي، إذ يساهم بأكثر من 97.99% من الطاقة المستغلة على سطح الأرض. أما المصادر الأخرى للطاقة، فلا تساهم إلا بنسبة ضئيلة جدًا لا تتجاوز 3%، وتشمل طاقة باطن الأرض والطاقة الناتجة عن الشلالات والمد والجزر.

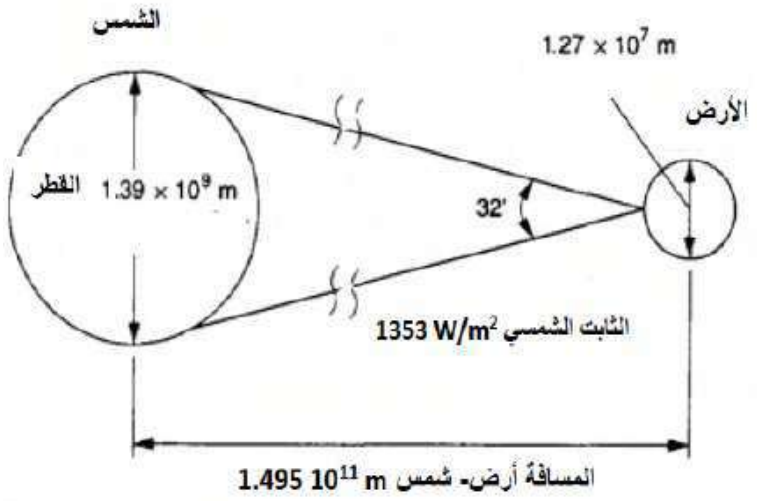
ويُعرّف الإشعاع بأنه انتقال الطاقة غير بسمة وانتشارها في حالاتها الحرارية والضوئية والكهرومغناطيسية .ويُطلق على هذا النوع من الإشعاع أحيانًا" الإشعاع الأثيري "ومصدره الشمس.[2]

ومن فضل الله عز وجل أنه سخر الشمس للكون، كما جاء في قوله تعالى :﴿وَسَخَّرَ الشَّمْسَ وَالْقَمَرَ كُلٌّ يَجْرِي لِأَجَلٍ مُّسَمًّى﴾) الرعد: الآية 2). الشمس عبارة عن نجم ملتهب تحدث فيه العديد من الانفجارات النووية بشكل مستمر ودائم .هذه الانفجارات هي سبب انتشار الطاقة لتصل إلى الأرض على شكل إشعاع شمسي، مما يمكّن الإنسان من استغلال هذا المورد الطاقوي في مختلف المجالات الحيوية.

الشمس في حد ذاتها كرة غازية يبلغ قطرها 1,391,000 كيلومتر، وتتراوح درجة حرارة مركزها بين 8×106 كلفن و40×106 كلفن، وتبعد عن الأرض مسافة تبلغ 149,598,000 كيلومتر.

وبما أن مدار الأرض له انحراف مركزي شبه دائري ضئيل لا يتجاوز 0.07675، فإن المسافة الفاصلة بين الشمس والأرض لا تتغير إلا قليلاً خلال السنة. بشكل عام، يمكن اعتبار الشمس جسمًا مشعًا تبلغ درجة حرارته 5800 كلفن.[3]

يستقبل كل موضع من سطح الأرض كمية معتبرة من الإشعاع الشمسي اليومي، من شروق الشمس إلى غروبها، بزوايا ورود شمسية مختلفة ناتجة عن حركة الأرض والشمس .كما تتغير شدة الإشعاع الشمسي المباشر لمكان معين حسب الموقع الجغرافي وحسب الزمن على مدار اليوم والفصل والسنة.[3]



الشكل 1.1:أبعاد وموضع الشمس والأرض.[4]

2.1 قانون بلانك الإشعاع الشمسي:

نظرية بلانك (Planck)تنص على أن الإشعاع الكهرومغناطيسي يتفاعل مع المادة وكأنه مكون من حزم صغيرة من الطاقة تسمى كمّات (quanta).يترجم هذا المفهوم إلى النموذج الجسيمي للضوء أو لأي موجة كهرومغناطيسية، والذي يمكن من خلاله حساب الطاقة المنقولة بواسطة الفوتون.

التعبير الرياضي لقانون بلانك هو : $\mathbf{E=h\,v}$ حيث:

- E هي الطاقة مقدرة بالجول.
- v هو تردد الإشعاع مقدراً بالهرتز.
- h هو ثابت بلانك ويساوي 6.63×10^{-34}جول.ثانية [5]

3.1 ثابت الإشعاع الشمسي :

يعرف ثابت الإشعاع الشمسي Solar constant بأنه كمية الطاقة الساقطة على وحدة مساحة من الارض متعامدة مع الشعاع الشمسي في وحدة زمنية .وتقدار بالواط على متر مربع W/m^2 ، تتغير قيمتها من مكان إلى آخر بسبب دوران الأرض حول محورها كل24ساعة (تعاقب الليل والنهار) ودورانها في شكل بيضاوي كل 365يوم (تعاقب الفصول الأربعة).[6]

4.1 طيف الإشعاع الشمسي:

وجد أن الإشعاع الشمسي يتكون من مجموعة الموجات الكهرومغناطيسية ، التي يتراوح طولها من 0.11 µ إلى 4 µ ، و يمكن يحتوي على أطوال موجية اكبر، لكن كمية الطاقة فيه قليلة جدا ولا تتجاوز1% من إجمالي طاقة الطيف الشمسي [7] .

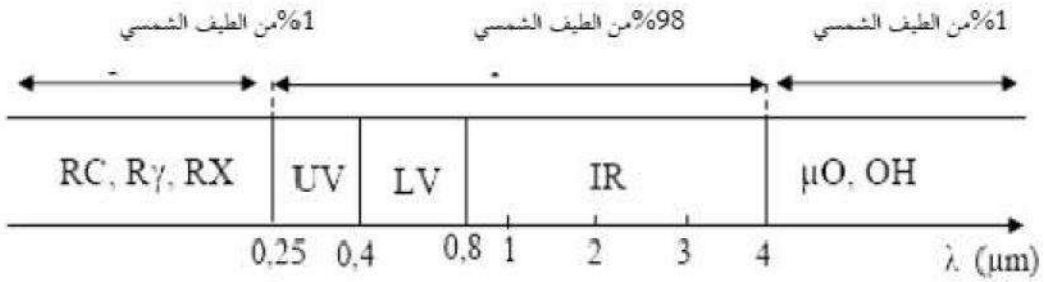
$\lambda\epsilon[0.25,0.4]\mu m$المجال فوق البنفسجي ويمثل 7%من الطاقة الكلية المنبعثة من الشمس.

$\lambda\epsilon[0.4,0.8]\mu m$المجال المرئي ويمثل 47.5%من الطاقة الكلية المنبعثة من الشمس.

$\lambda\epsilon[0.4,0.8]\mu m$المجال تحت الأحمر ويمثل 45.5%من الطاقة الكلية المنبعثة من الشمس.

كما أن طيف الإشعاع الشمسي يحاكي إشعاع الجسم الأسود عند درجة الحرارة $T=5600k°$

$\lambda\epsilon[0.25,4]\mu m$ **[9]**.



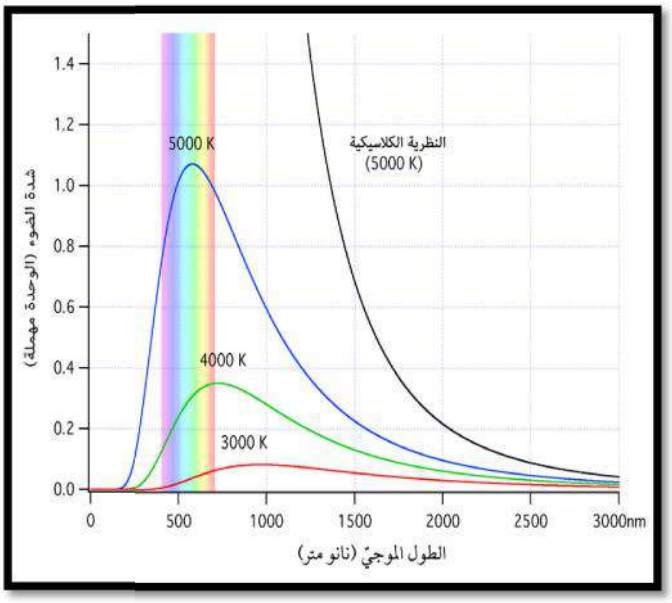
الشكل2.1: يمثل توزيع طيف الإشعاع الشمسي.[9]

.5

يوجد نوعين من الإشعاع الشمسي الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي ،و الإشعاع الشمسي على سطح الأرض .[10]

1.5.1 الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي

يتم امتصاص أكثر من 25%من الإشعاع خارج الأرض بواسطة الغازات الدفيئة مثل (CO_2وO_3) و من الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى سطح الأرض ،يوجدحوالي52%من الطاقة في نطاق الأشعة تحت الحمراء(700نانومتر) و43% في نطاق الضوئي المرئي(400_700نانومتر) وحوالي5% في نطاق الاشعة فوق البنفسجة (400نانومتر)من الشكل (1_2) .[10,11]



الشكل3.1: لتوزيع الطيفي للإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي للأرض

نظرا لتغير المسافة بين الشمس والأرض بشكل مستمرخلال العام،فإن شدة الاشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي للأرض تكون متغيرة تبعا لتلك المسافة والوضع للسطح المستقبل الأشعة . بالنسبة للشمس ، يبين الشكل (1_4)تغير شدة الإشعاع الشمسي العمودي على وحدة الاسطح خارج الغلاف الجوي H_{on} مقارنة مع القيمة الاسمية للثابت الشمسي وقدرها$1353[m^2W/]$علما أن هذا التغير

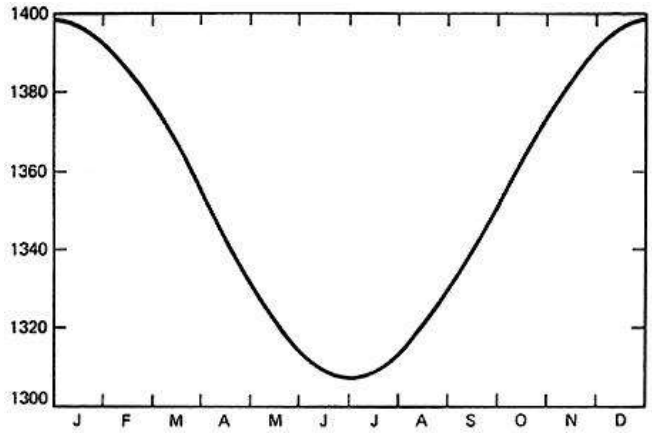
خلال العام يكون تقريبا بحدود 3.5% و يمكن التعبيرعن هذاالمخطط بالعلاقة الرياضية التقريبة الآتية:

$$H_{on}=H_{sc}\ [1+0.033\cos(\frac{360n}{350})] \qquad (1_1)$$

وشدة الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي الساقط على سطح أفقي عند توقيت معين خلال السنة يعطى بالعلاقة الآتية :

$$H_{ch}=H_{on}sin\alpha =H_{on}cos\theta_z \qquad (2_1)$$

ملاحظة:وحدة الإشعاع الشمسي بـ kW/m^2



الشكل1_4: تغير الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي على مدار السنة.

بشكل عام يكون المطلوب عادة تحديد كمية الطاقة المحمولة مع هذه الأشعة الشمسية خلال فترة محددة (ساعة _يوم _شهر_سنة) يتم ذلك بإجراء التكامل خلال الفترة ،أي أن الطاقة المحمولة مع الأشعة الشمسية خلال ساعة على سطح أفقي خارج الغلاف الجوي يتم حسابها بالعلاقة :**[10,11]**

$$H_{hext}=\int_{\tau_1}^{\tau_2} H_{oh} \times d_\tau \qquad (3_1)$$

τ_1 و τ_2 هما الوقت حسب التوقيت الشمسي (بداية ونهاية الساعة الاعتبارية)

بإجراء التكامل خلال فترة زمنية معينة (مثال ساعة واحدة) نحصل على العلاقة الآتية :

$$H_{h\,ext} = (\frac{12}{\pi})[1+0{,}033\cos(\frac{360n}{350})] \qquad (4_1)$$

$$H_{h\,ext} = (\frac{2\pi}{360} h_{ss})[(h_2 - h_1)\sin L \sin\delta + \cos L \cos\delta \sin h_{ss} \qquad (5-1)$$

$h_2 h_1$ هما زوايتا الساعة الشمسية عند بداية ونهاية الساعة المقصودة بالدرجات على طول النهار

h_{ss}: يمثل زاوية الساعة الشمسية عند الغروب بالدرجات **[10]**

2.5.1 الإشعاع الشمسي على سطح الأرض.

يمثل الإشعاع الشمسي أكبر تدفق للطاقة يدخل إلى النظام البيئي الأرضي حوالي 1361 واط لكل متر مربع خارج الغلاف الجوي..وبعملية الانعكاس و عملية الامتصاص في الغلاف الجوي يصل ما يقارب 1000 واط الى 1100 واط في المتر المربع على سطح الأرض.

يمكن تحويل هذه الطاقة إلى مختلف أشكال الطاقة المستخدمة من طرف الإنسان، باستثناء بعض المصادر مثل الطاقة النووية، والطاقة الحرارية الأرضية، وطاقة المد والجزر. ويُعدّ هذا المورد الهائل مصدراً مستداماً، حيث إن كمية الطاقة الشمسية الواصلة إلى سطح الأرض تُقدَّر بما يقارب **6000مرة** من الاستهلاك العالمي للطاقة الأولية الذي يبلغ حوالي **13.7تيرا واط**، مما يبرز أهمية استغلاله في مختلف تطبيقات الطاقة الشمسية واستخداماتها. **[12]**

3.5.1 الإشعاع الشمسي المباشر Beam Radiation

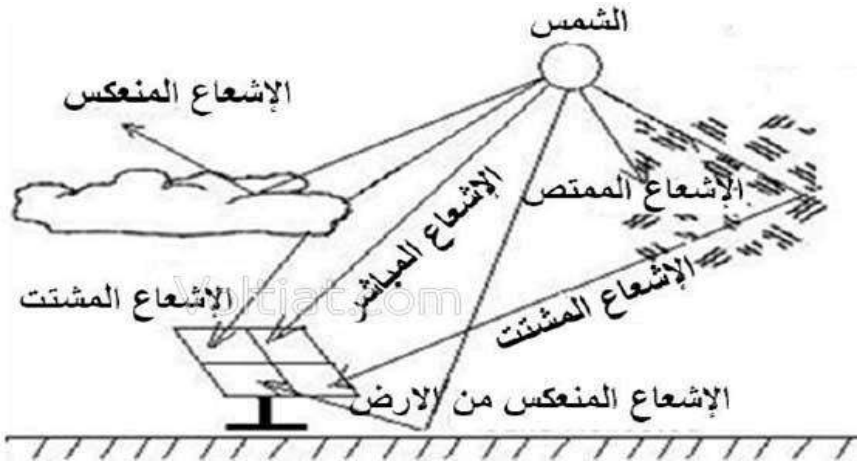
هو الإشعاع الساقط من الشمس على شكل حزم بدون أي انتشارا وتبعثر خلال الغلاف الجوي لذلك يكون اتجاهه ثابتا لا يتغير اثناء مروره بالغلاف الجوي.[13]

4.5.1 الإشعاع الشمسي المنتشر Diffuse Radiation

هو الإشعاع الشمسي الساقط من الشمس ينتشر ويتبعثر ويتغير أثناء مروره بالغلاف الجوي حيث ينقسم الشعاع المنتشر إلى جزئين: الأول الشعاع المنتشر في السماء والثاني هو الشعاع المنعكس من محيط سطح الأرض.[13].

5.5.1 الإشعاع الكلي :

هو مجموع الإشعاع المباشر والمنتشر.



الشكل1_5: يوضح أنواع الإشعاع الشمسي الرئيسية. [14]

6.1 توازن الطاقة في الأرض :

يوجد توازن طاقة معقد بين الإشعاع الوارد والصادر على الأرض ، حيث ينعكس ما يقرب من ثلث الطاقة الشمسية الساقطة إلى الفضاء ،في حين يتم امتصاص الباقي في الغلاف الجوي والمحيطات والمواد العضوية وغير العضوية على الأرض .تعمل الطاقة الشمسية الممتصة على دفع عمليات الأرصاد الجوية والهيدرولوجية مثل الرياح و الأمواج وذوبان الجليد ويكون لهذا التوازن بين الإشعاع الصادر و الوارد تأثير كبير على مناخ الأرض .[15]

كما نلاحظ أن سماكة الغلاف الجوي الذي يخترقه الإشعاع الشمسي تصبح أصغرية عندما تصبح

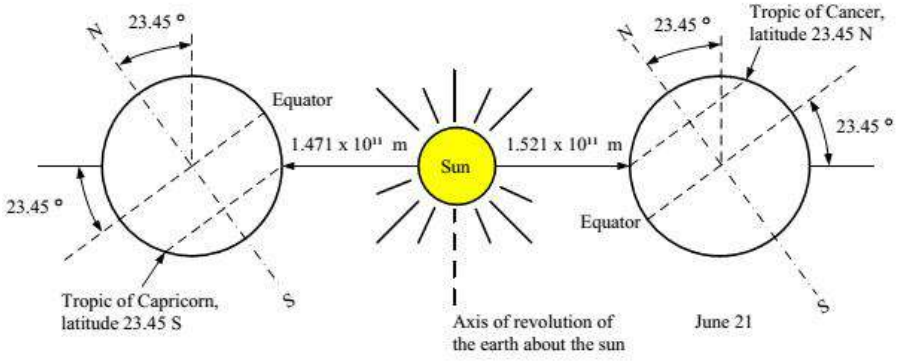
الشمس عمودية في منتصف النهار وبالتالي تمرر الإشعاع الشمسي بكميات كبيرة جدا عندها تكون الطاقة الواصلة إلى الأرض أعظمية ، أما عند شروق وغروب ينعكس الأمر تماما فتصبح سماكة الغلاف الجوي أعظمية فلا تسمح بمرور الإشعاع الشمسي إلا بكميات صغيرة وتكون الطاقة الواصلة إلى الأرض أصغرية. وعلى هذا نجد في المناطق المرتفعة عن سطح الأرض يكون فيها حجم طاقة الإشعاع الشمسي مرتفع جدا.

7.1 أهم الزوايا الشمسية :

1.7.1 زاوية الميل الشمسي (δ) :

زاوية الميل الشمسي هي الزاوية بين مستوى سطح الأرض ومستوى الشمس. تتغير هذه الزاوية على مدار اليوم والفصول، وتؤثر بشكل كبير على كمية الطاقة الشمسية التي تصل إلى سطح الأرض. حيث تدور الأرض حول الشمس في مدار اهليليجي تكمل دورة كاملة خلال 365.25 يوم .تكون المسافة (أرضي_شمس) اقل قيمة لها في 21ديسمبر و تبلغ ($1,47 \times 10^{11}m$)،كما تبلغ قيمتها العظمى ($1,52 \times 10^{11}m$) في 21 جوان الشكل (1_6). [16]

يصنع محور دوران الأرض حول نفسها مع الناظم على المستوى الاهليليجي (مستوى دوران الارض حول الشمس) زاوية ميل δ تتغير قيمتها بين $23.45°$ و$-23.45°$ على مدار السنة .



الشكل 1_6:حركة الأرض بالنسبة للشمس.[16]

وتعطى عبارة زاوية الميل الشمسي لكل يوم من السنة بالعلاقة :

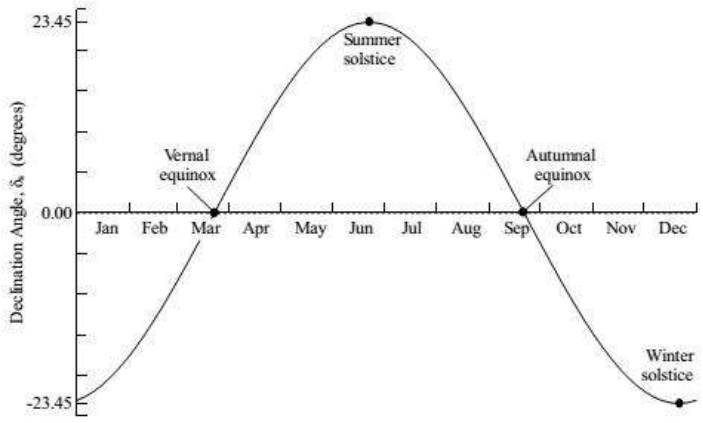
$$\delta = 23.45° \sin\frac{360}{365}(284 + N_j) \qquad (6_1)$$

حيث نأخذ القيمة العظمى

(23.45+) في 21جوان انقلاب صيفي.

(23.45-)في 21ديسمبرانقلاب شتوي.

بينما تكون معدومة($\delta = 0$)في الاعتدالين الخريفي في 21سبتمبر والربيعي في 21مارس كما يبين الشكل (1_7).[16]



الشكل 1_ 7بيان تغيرات زاوية الميل شمسي خلال أيام السنة.

يمكن تتبع حركة الشمس من الشروق للغروب في نقطة ما من سطح الأرض من خلا ل زاويتي الارتفاع h وزاوية السمت a.

2.7.1 زاوية الارتفاع (h):

تتناسب شدة الأشعة الشمسية الساقطة على سطح الأرض مع زاوية الارتفاع الشمسي في السماء طرديا ،وعندما تكون زاوية ارتفاع الشمس حوالي 90 °، تكون الشمس متعامدة على سطح الأرض. عموما زاوية ارتفاع الشمس هي التي تحدد طول المسافة التي سيقطعها الإشعاع الشمسي خلال الغلاف الجوي**[17]**.

ويتغير مجال قيمتها كما يلي :$h \in [-90°, +90°]$ **[18]**

$$\sin(h) = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega. \qquad (7\text{-}1)$$

h=0 : عند الشروق والغروب

h>0 : في النهار

h<0: في الليل **[19]**

حيث:

ω : الزاوية الساعية الشمسية.

φ: زاوية دائرة العرض.

3.7.1 زاوية السمت الشمسي(a):

زاوية السمت الشمسي هي الزاوية بين الشمال الحقيقي والاتجاه الذي تشير إليه الشمس في السماء. بمعنى آخر، هي الزاوية الأفقية التي تحدد موقع الشمس في السماء بالنسبة للموقع سطح الأرض.و زاوية السمت الشمسي a:هي زاوية شعاع الشمس المقاسة على المستوى الافقي من اتجاه الجنوب الحقيقي (للنصف الشمالي من الكرة الأرضية.)، أو اتجاه الشمال الحقيقي(للنصف الجنوبي من

الكرة الأرضية)،تأخذ الزاوية الإشارة الموجبة إذا كانت في الاتجاه الغربي ،تتراوح قيمتها في المجال

$-180 \leq a \leq +180$ [21][20]

حيث:

a=0: مسقط الشعاع الشمسي منطبق على المحور جنوبا .

a> مسقط الشعاع الشمسي منحرف عن محور جنوبا بالاتجاه الغرب.

a<0: مسقط الشعاع الشمسي منحرف عن المحور جنوبا باتجاه الشرق.

وتعطى بالعلاقة التالية:

$$\sin a = \frac{\cos(\delta)\sin(\omega)}{\cos(\beta)} \qquad (8_1)$$

4.7.1 زاوية سمت الرأس (Z):

زاوية سمت الرأس(**Zenith Angle**) هي الزاوية بين **الرأس** (أعلى نقطة في السماء) و **الشمس** .بمعنى آخر، هي الزاوية الرأسية التي تحدد موقع الشمس في السماء بالنسبة للمراقب على الأرض.

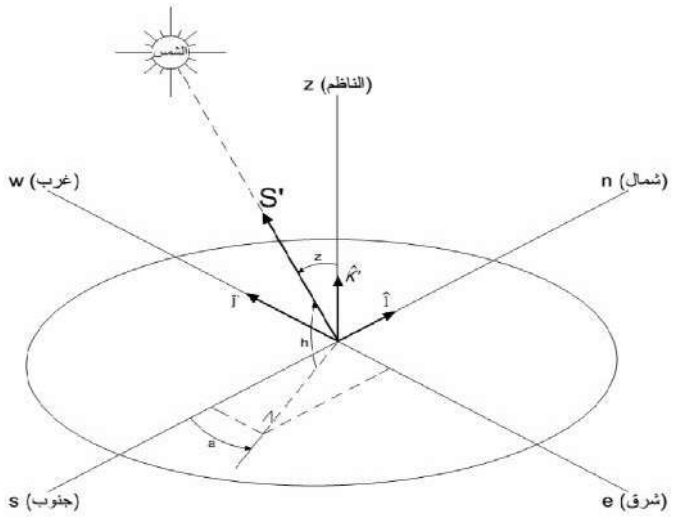
وهي الزاوية التي تقع بين الشعاع الشمسي وسمت الأرض (الخط الشاقولي المار بالموقع،) وبذلك فهي متممة زاوية الارتفاع الشمسي.**[22]**

$$\mathbf{Z = 90 - h} \qquad (9_1)$$

حيث:

Z : هي زاوية سمت الرأس.(Zenith angle)

h : هي زاوية الارتفاع.(Altitude angle)



الشكل 1_8:الزوايا الشمسية (z,a,h).[20]

5.7.1 زاوية خط العرض (φ):

قيمتها تتراوح في المجال (90°) ≤ φ ≤(90°)،وهي الموضع الزاوي للمنطقة المدروسة بالنسبة الى مستوي خط الإستواء .**[21]**

φ<0:شمال خط الإستواء.

φ > 0:جنوب خط الإستواء.

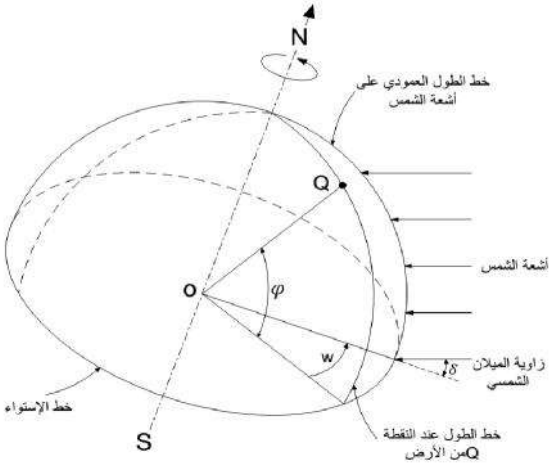
6.7.1 الزاوية الساعية (ω):

نتيجة دوران الأرض حول نفسها فإن الشعاع الشمسي يمسح دورة كاملة حول الأرض 360°h خلال 24 وفق دائرة العرض ،أي 15° لكل ساعة ،مع اعتبار الزوال هو المبدأ (ω = 0) ، تعطى عبارة الزاوية الساعة الشمسية بالعلاقة :**[23]**

$$\omega = 15(TV_S - 12) \qquad (10_1)$$

حيث TV_S يمثل التوقيت الشمسي الحقيقي الذي يعتمد الزوال الشمسي في المنطقة ($\omega = 0$) عند الساعة 12:00 زوالا.

وتكون $\omega > 0$ مساءا بينما تكون $\omega < 0$ صباحا الشكل (1_9)



الشكل (1_9)زاوية الساعة الشمسية ودائرة خط العرض [22].

1.7.7 زاوية خط الطول(L) :

الزاوية بين خطوط الطول :تقاس الزاوية بين أي خط طول وخط غرينتش بالدرجات (°)، وتتراوح بين 0° عند خط غرينتش و 180° شرقًا أو غربًا.

عدد خطوط الطول :يوجد 360 خط طول حول الأرض، أي أن كل خط طول يمثل زاوية 1° (360° / 360 خط طول = 1°)

تستخدم زوايا خطوط الطول مع زوايا خطوط العرض لتحديد المواقع بدقة على سطح الأرض .وتستخدم زوايا خطوط الطول لتحديد التوقيت في المناطق المختلفة حول العالم، حيث أن كل 15° من خطوط الطول تتوافق مع ساعة واحدة من الوقت.

وللمنطقة المدروسة بالنسبة إلى مستوي خط الطول الرئيسي غرينتش تكزن قيمة L محصورة في المجال $(-180°) \leq L \leq (+180°)$ **[21]**.

8.7.1 زاوية الورود (السقوط)الشمسي (θ):

هي الزاوية بين الناظم والشعاع الشمسي الوارد على السطح المدروس ،وقيمتها في المجال $(180°) \geq \theta \geq (0°)$ و تعطى بالمعادلة التالية: **[23]**

حساب زاوية الورود الشمسي(θ) ، نستخدم المعادلة التالية:

$$\cos(\theta) = \sin(\delta)\sin(\varphi) + \cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(h) \qquad (11_1)$$

حيث :

- **θ :** زاوية الورود الشمسي (الزاوية بين شعاع الشمس والسطح)
- **δ :** زاوية ميل الشمس (زاوية ميل الشمس شمالًا أو جنوبًا عن خط الاستواء السماوي)
- **φ :** خط عرض الموقع (الزاوية بين خط الاستواء وخط عرض الموقع)
- **h:** زاوية الساعة (الزاوية بين خط الزوال المحلي وخط الزوال الشمسي)

9.7.1 معادلة التصحيح الزمني (Et):

هي معادلة تستخدم لحساب الفرق بين التوقيت الشمسي الظاهري والتوقيت الشمسي المتوسط.

التوقيت الشمسي الظاهري هو الوقت الذي يتم تحديده من خلال مراقبة الشمس مباشرة، بينما التوقيت الشمسي المتوسط هو وقت افتراضي يعتمد على حركة الشمس المنتظمة على مدار السنة. [24]:

$$Et == 0.258\cos x - 7.416\sin x - 3.648\cos 2x - 9.228\sin 2x \quad (12-1)$$

حيثX مقدرة بالدرجات :

$$x = \frac{360(N_j - 1)}{365.242} \quad (13_1)$$

10.7.1 الكتلة الهوائية الضوئية (AM):

هي نسبيا مقياس لطول المسار الذي يخترقه ضوء الشمس عبر الغلاف الجوي للوصول الى الأرض. و يمثل السقوط العمودي للضوء. عندما يمر ضوء الشمس عبر الغلاف الجوي، يتشتت ويمتص بواسطة جزيئات الهواء والغبار والأوزون. وهذا يؤثر على طيف وكمية الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى سطح الأرض.

عندما تكون الشمس متعامدة فان الكتلة الهوائية الضوئية مساوية للواحد ،تعطى بالعلاقة :[24].

$$AM = \frac{OA}{OB} = \frac{1}{\sin h} \quad (14_1)$$

AM0 يعني "بدون غلاف جوي"، ويشير إلى طيف الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي للأرض.

AM1 يعني أن الشمس عمودية تمامًا، ويكون المسار عبر الغلاف الجوي هو الأقصر.

AM1.5 يعتبر معيارًا شائعًا، ويمثل زاوية سقوط الشمس 48 درجة بالنسبة للعمودي.

وتحسب كتلة الهواء اذا كان الضغط P يختلف عن 1013ملي بار والعلو (zكم) ويطلق عليه " عدد هواء كتلة جوية" و هو العدد الحاصل (m)حينما تكون OA=1 في المعادلة التالية :

$$m=\frac{p}{1013}\frac{1}{\sin(h)}exp\left(-\frac{z}{7.8}\right) \qquad (15_1)$$

8.1 أجهزة قياس الإشعاع الشمسي :

قياس كمية الإشعاع الشمسي أمر حيوي و ضروري لتصميم وتشغيل أنظمة الطاقة الشمسية. وتساعد مراكز الأرصاد الجوية في فهم الظواهر الجوية والمناخ. حيث يتم تحديد قيمة الإشعاع الشمسي الساقط بواسطة تقنيات القياس المناسبة باستعمال أجهزة قياس خاصة للقياس ولتسجيل المعطيات .

تستخدم عدة أنواع من الأجهزة لقياس الإشعاع الشمسي، منها:

البيرانومتر(Pyranometer) لقياس الإشعاع الشمسي الكلي (المباشر والمنتشر) و الذي يعتمد على امتصاص الحرارة الناتجة عن الإشعاع الشمسي وتحويلها إلى إشارة كهربائية او قيم رقمية .

الهليومتر heliometer لقياس الإشعاع الشمسي المباشر فقط. يستخدم بنظام تتبع شمسي لتوجيه الجهاز بدقة نحو الشمس وقياس الإشعاع المباشر الساقط عليه.

و هناك أجهزة قياس أخرى منها جهاز قياس الإشعاع السماوي :يقيس الإشعاع المنتشر فقط.وجهاز قياس الإشعاع الشمسي الطيفي لقياس الإشعاع الشمسي في نطاقات طيفية محددة.

يبين الشكل (1_10) الأنواع المختلفة لأجهزة قياس الإشعاع الشمسي الكلي (المباشر والمنتشر).

الشكل(1_10) مختلف أجهزة قياس شدة الإشعاع الشمسي [26]

9.1 تأثير العوامل الجوية على الإشعاع الشمسي

يتأثر الإشعاع الشمسي بعدة عوامل جوية عند مروره عبر الغلاف الجوي للأرض، مما يؤثر على كمية الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى سطح الأرض. أهمها :

- **السحب و صفاء الجو** : تعتبر السحب من أهم العوامل التي تؤثر على الإشعاع الشمسي. يمكن للسحب أن تعكس وتمتص جزءًا كبيراً من الإشعاع الشمسي، مما يقلل من كمية الإشعاع الذي يصل إلى سطح الأرض.
- **الرطوبة** :يمكن أن تمتص الرطوبة في الغلاف الجوي جزءًا من الإشعاع الشمسي، ويتسبب الضباب أو الندى في انعكاس او حجب جزءًا من الإشعاع الشمسي.
- **الهباء الجوي(الغبار والدخان والملوثات الأخرى)** : يسبب تشتيت و امتصاص كمية من الإشعاع وتدهور جودة الإشعاع الشمسي.
- **درجة الحرارة** : تؤثر درجة الحرارة على كثافة الهواء وبالتالي على كمية الإشعاع الشمسي العابر للغلاف الجوي.

- **الضغط الجوي والتمدد الهواء والارتفاع عن سطح البحر:** تؤثر أيضا على الإشعاع الشمسي
- **الموقع الجغرافي:** موقع المناطق الواقعة على خطوط العرض قريبة من خط الاستواء يتوافر فيها الإشعاع الشمسي أكثر من غيرها.

لهذه العوامل كلها تأثير كبير على المواقع التي تعتمد على. إنتاج الطاقة الشمسية. [27]

10.1. الإشعاع الشمسي و العوامل الجوية لمنطقة ورقلة (الجزائر)

يقع حوض ورقلة في الجنوب الشرقي للجزائر وهو حوض من المنخفض الصحراوي الكبير، يبلغ طوله 30 كلم ،و عرضه يتراوح بين 12 و 18 كلم .وارتفاعه بين 103 و 150 م فوق مستوى سطح البحر، إحداثياته : خط الطول 4.976654 :درجة شرقا وخط العرض : 32.1677808درجة شمالا.

منطقة ورقلة تمتاز بمناخ صحراوي جاف وحار، حيث ترتفع درجة الحرارة بشكل كبير خلال فصل الصيف، وتنخفض بشكل ملحوظ في فصل الشتاء. و تعتبر ورقلة من المناطق ذات الإشعاع الشمسي المرتفع في الجزائر، حيث تتلقى كميات كبيرة من الطاقة الشمسية على مدار السنة.

1.10.1 تقدير الإشعاع الشمسي في منطقة ورقلة

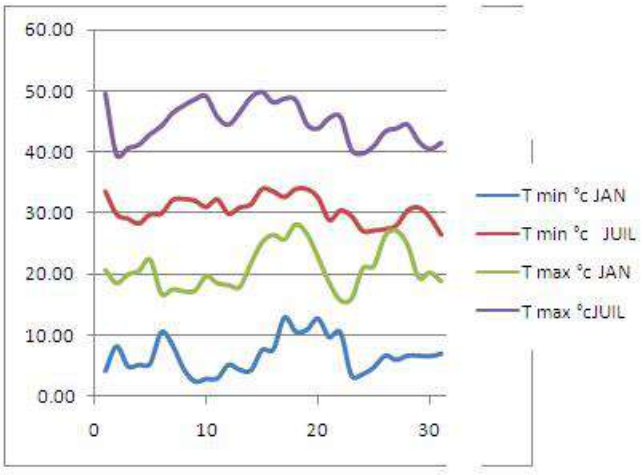
يمكن تقدير الإشعاع الشمسي في ورقلة باستخدام بيانات الأقمار الصناعية أو من خلال نماذج رياضية .وحسب المعلومات المتحصل عليها من مركز الأرصاد الجوي لشهر جانفي و شهر

جويلية و التي شملت كل درجات الحرارة و ساعات التشميس و سرعة الرياح و الرطوبة و كمية الإشعاع الشمسي اليومي .

2.10.1 :درجات الحرارة المسجلة في شهر جانفي و شهر جويلية :

جدول 1-1 درجات الحرارة الشهري جانفي و جويلية بمنطقة ورقلة

اليوم	T min °c لشهر جانفي	T min °c لشهر جويلية	T max °c لشهر جانفي	T max °c لشهر جويلية	اليوم	T min °c لشهر جانفي	T min °c لشهر جويلية	T max °c لشهر جانفي	T max °c لشهر جويلية
1	4.10	33.50	20.70	49.50	17	12.80	32.60	25.70	48.70
2	8.10	29.80	18.60	39.60	18	10.50	33.90	28.10	48.50
3	4.90	29.10	20.00	40.70	19	10.80	33.90	26.60	44.60
4	5.10	28.30	20.60	41.30	20	12.60	32.50	22.80	43.90
5	5.30	29.80	22.40	43.00	21	9.60	28.90	18.70	45.60
6	10.40	29.90	16.90	44.30	22	10.40	30.40	15.80	45.80
7	8.30	32.10	17.60	46.40	23	3.30	29.50	16.10	40.40
8	4.40	32.30	17.30	47.60	24	3.60	27.10	21.00	39.90
9	2.40	32.00	17.40	48.60	25	4.70	27.20	21.40	41.10
10	2.80	31.00	19.70	49.10	26	6.60	27.40	26.30	43.40
11	2.90	32.20	18.60	45.80	27	5.90	28.00	27.10	43.90
12	5.10	29.90	18.30	44.50	28	6.60	30.40	24.80	44.50
13	4.30	30.90	18.00	46.50	29	6.60	30.90	19.50	41.80
14	4.20	31.40	21.80	48.90	30	6.50	29.30	20.30	40.60
15	7.50	33.90	25.20	49.80	31	6.90	26.50	18.90	41.60
16	7.60	33.50	26.40	48.10					



الشكل(1_11) منحنيات درجات الحرارة الدنيا و القصوى

من المنحنيات نلاحظ ان أقصى درجة حرارة للمنطقة تصل الى 50 درجة مئوية في شهر جويلية و تكون الدنيا في حدود 2 درجة مئوية في شهر جانفي .

3.10.1: الإشعاع الشمسي المسجلة في شهر جانفي و شهر جويلية

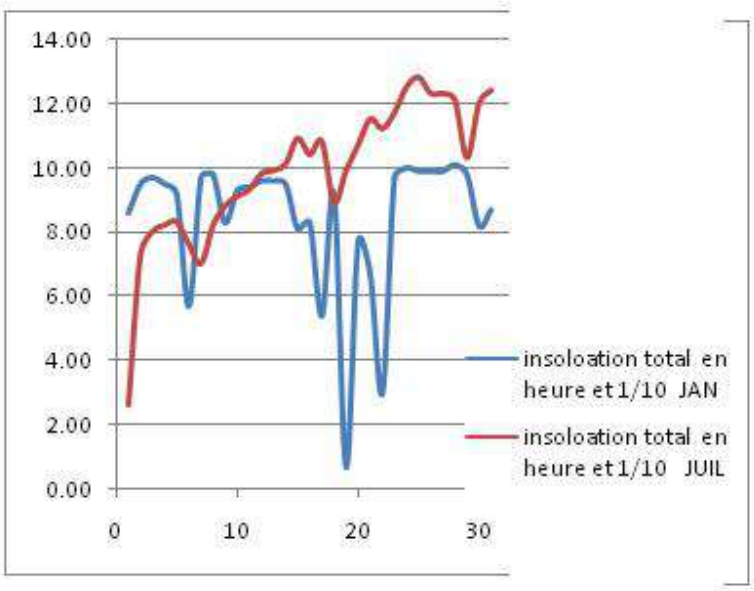
تميز منطقة ورقلة بمناخ مشمس طوال العام. يبلغ متوسط الإشعاع الشمسي السنوي فيها حوالي 3500 ساعة. هذا يعني أن ساعات التشميس المتوسط من 9 إلى 10 ساعات يومياً.

- **ساعات التشميس اليومية**

تتراوح بين شهر **جانفي** 7.5 :ساعات/يوم ، شهر ماي 12 ساعة/يوم ، **جويلية** 13 :ساعة/يوم الى **ديسمبر** 7 ساعات/يوم وعليه يكون متوسط عدد ساعات التشميس هو **10 ساعات يوميا**

جدول 1-2 ساعات التشميس لشهري جانفي و جويلية بمنطقة ورقلة

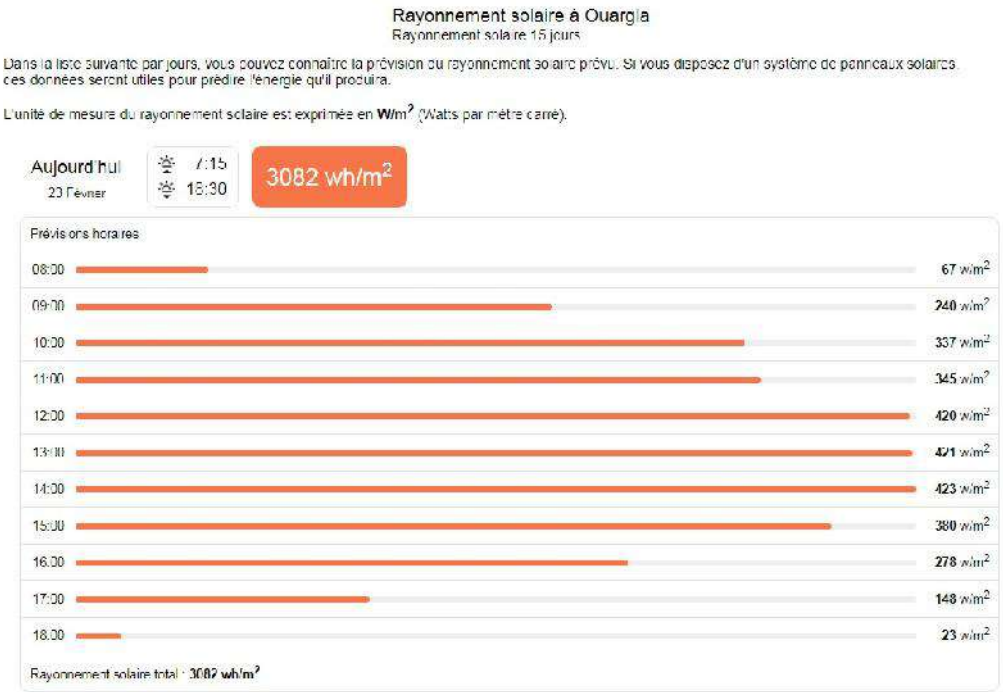
jour	insoloation total en heure et 1/10 JAN	insoloation total en heure et 1/10 JUIL	jour	insoloation total en heure et 1/10 JAN	insoloation total en heure et 1/10 JUIL
1	8.60	2.60	17	5.40	10.80
2	9.50	7.30	18	9.20	8.90
3	9.70	8.00	19	0.70	9.90
4	9.50	8.20	20	7.70	10.70
5	9.20	8.30	21	6.70	11.50
6	5.70	7.60	22	3.00	11.20
7	9.70	7.00	23	9.70	11.70
8	9.80	8.20	24	10.00	12.50
9	8.30	8.80	25	9.90	12.80
10	9.30	9.10	26	9.90	12.30
11	9.40	9.30	27	9.90	12.30
12	9.60	9.80	28	10.10	12.10
13	9.60	9.90	29	9.80	10.30
14	9.50	10.10	30	8.20	12.00
15	8.10	10.90	31	8.70	12.40
16	8.30	10.40			



الشكل(1_12) عدد ساعات التشميس لأيام شهر جانفي و شهر جويلية

- **التقديرات اليومية للإشعاع الشمسي في المنطقة :**

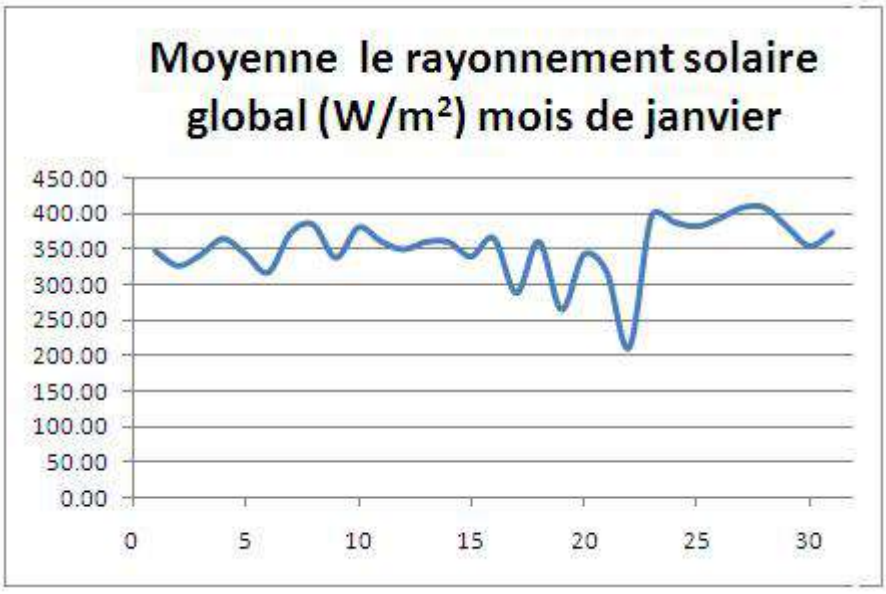
يتم قياس الإشعاع الشمسي اليومي W/m2 لكل ساعة من 8.00 صباحا الى 18.00 ومجموعها هو مقدار الإشعاع الكلي اليومي Wh/m2



الشكل(1_13) : قياسات الإشعاع الشمسي ليوم كامل بمنطقة ورقلة (موقع الارصاد الجوي

جدول 1-3 الإشعاع الشمسي المتوسط لشهر جانفي بمطقة ورقلة

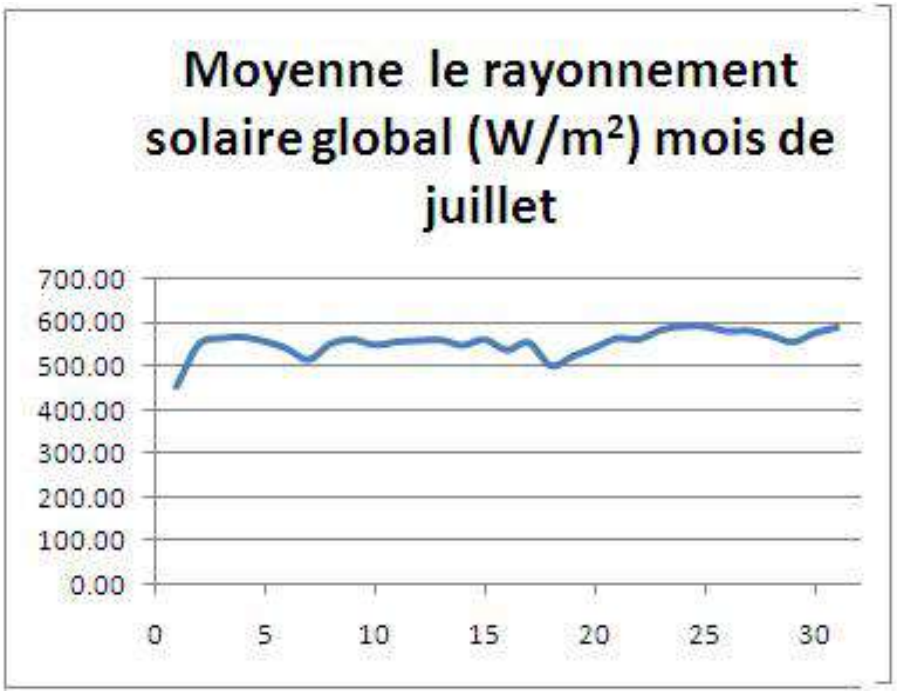
jour	Moyenne R. global W/m² MOIS JAN	jour	Moyenne R. global W/m² MOIS JAN
1	347.07	17	288.01
2	326.52	18	360.72
3	341.82	19	264.87
4	364.72	20	342.70
5	342.94	21	318.51
6	317.21	22	210.89
7	373.18	23	397.44
8	384.46	24	388.05
9	337.80	25	382.26
10	380.86	26	393.13
11	361.07	27	408.50
12	349.68	28	408.87
13	360.39	29	381.66
14	360.05	30	354.37
15	339.44	31	373.47
16	365.63		



الشكل(1_14) : متوسط الإشعاع الشمسي المتوسط لشهر جانفي

جدول 1-4 : الإشعاع الشمسي المتوسط لشهر جويلية بمطقة ورقلة

jour	Moyenne le rayonnement solaire global (W/m^2) mois de juillet	jour	Moyenne le rayonnement solaire global (W/m^2) mois de juillet
1	455.65	17	555.16
2	550.30	18	503.19
3	564.66	19	524.63
4	567.61	20	543.29
5	557.83	21	564.43
6	541.95	22	562.65
7	516.82	23	583.66
8	552.50	24	591.76
9	562.06	25	591.32
10	549.51	26	581.10
11	556.93	27	581.56
12	559.49	28	570.90
13	561.16	29	556.29
14	549.03	30	576.74
15	561.95	31	588.88
16	538.06		



الشكل(1_15) : متوسط الإشعاع الشمسي المتوسط لشهر جويلية

4.10.1 : تأثير العومل الجوية على شدة الإشعاع الشمسي

يتأثر الاشعاع الشمسي الساقط على الارض بعدة عوامل جوية و بها تتأثر الأنظمة الكهروشمية و الحرارية في استغلال الطاقة الشمسية .

- **تأثير نسبة الرطوبة على شدة الإشعاع الشمسي**

تعمل الرطوبة على امتصاص وتشتت الإشعاع :تمتص جزيئات الماء الموجودة في الغلاف الجوي جزءاً من الإشعاع الشمسي، وتسبب جزيئات الماء في تشتت الإشعاع و يقلل من شدته .

وتسبب نسبة الامتصاصية للضوء وفق قانون بير لامبير beer lambert في تخفيض نسبة من شدة الاشعاع الذي يصل الارض .

الصيغة الرياضية لقانون بير لامبرت [28] **هي :**

$$A = \varepsilon c l \qquad (16_1)$$

حيث أن:

A :هي الامتصاصية(Absorbance)

E : هو معامل الامتصاص المولاري(Molar absorptivity)

C :هو تركيز المادة(Concentration)

l :هو طول المسار(Path length)

- **تأثير سرعة الرياح على شدة الإشعاع الشمسي**

تؤثر الرياح على شدة الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى الأرض، في **امتصاص** وتشتيت **الإشعاع بسبب الغبار والأتربة والرمل العالقة في** الهواء وزيادة **التبخر** وتكوين **السحب، ونقل الملوثات**، وتغيير درجة الحرارة.

- **تأثير درجة الحرارة على شدة الإشعاع الشمسي**

تؤثر درجة الحرارة على شدة الإشعاع الشمسي بشكل مباشر وبشكل غير مباشر. حيث تؤثر درجة حرارة الغلاف الجوي على كثافة وتركيب الهواء، مما يؤثر بدوره على امتصاص وتشتت الإشعاع الشمسي.

وكذلك يمكن لدرجة الحرارة ان تسبب في تشكيل السحب و التي تحجب جزءاً كبيراً من الإشعاع الشمسي وتمنع وصوله إلى سطح الأرض.

ونجد العلاقة بين درجة الحرارة والإشعاع الشمسي علاقة معقدة وغير خطية،يمكن حساب التأثير باستعمال كل من : قانون ستيفان–بولتزمان للعلاقة بين درجة حرارة الجسم والإشعاع الذي يبعثه. كلما زادت درجة حرارته،

$$E = \sigma T^4 \qquad (17_1)$$

حيث : E : كثافة الطاقة الإشعاعية (واط/م²)

σ : ثابت ستيفان-بولتزمان(5.67×10^{-8} واط/م² كلفن⁴)

T : درجة الحرارة المطلقة (كلفن)

وقانون بلانك الخاص بطيف الإشعاع الذي يبعثه جسم أسود مثالي عند درجة حرارة معينة. ويستخدم لحساب توزيع الطاقة عبر الأطوال الموجية المختلفة للإشعاع الشمسي

$$B(\lambda, T) = (2hc^2/\lambda^5) / (e^{(hc/\lambda kT)} - 1) \qquad (18_1)$$

حيث: B(λ, T) : كثافة الإشعاع عند طول موجي λ ودرجة حرارة T

h : ثابت بلانك

c :سرعة الضوء

k : ثابت بولتزمان

و تعتبر العلاقة بين درجة الحرارة والإشعاع الشمسي معقدة وتخضع للعديد من العوامل الأخرى. لحسابات دقيقة. [29]

11.1 قياسات العوامل الجوية و الإشعاع الشمسي ليوم 15 جانفي و 15جويلية لمنطقة ورقلة

من الجدول (1-5) التالي ، يمكن استنتاج القيم الدنيا ة القيم القصوى في للفصلين الشتاء و الصيف لمحل الدراسة (منطقة ورقلة)

جدول 1-5 : العومل الجوية ليوم في شهر جانفي و يوم في شهر بمطقة ورقلة

jour	T min °c	T max °c	jour	T min °c	T max °c
le 15 Janvier	7.50	25.20	le 15 juillet	33.90	49.80
	Insolation total en heure et 1/10	vitesse moyen en m/s		Insolation total en heure et 1/10	vitesse moyen en m/s
	8.10	2.88		10.90	2.38
	humidité %	Moyenne R. global W/m²		humidité %	Moyenne R. global W/m²
	32.50	339.44		9.75	561.95

مراجع الفصل الأول

[1]محمد مصطفى محمد الخياط، مركزات الطاقة الشمسية، القاهرة،.2006

[2]مدونة الجغارقة للدراسات والأبحاث الجغرافية، المغرب،.2022

[3]فراح هاجر وميهوبي خولة، المركزات الشمسية وأنظمة تخزين الطاقة الحرارية، جامعة قاصدي مرباح، ورقلة،.2018

[4] M. Iqbal, An Introduction to Solar Radiation, Academic Press, Toronto, 1983.

[5]ب .جوردن، فيزياء القرن العشرين، الدار العربية للنشر والتوزيع، الإمارات العربية المتحدة،.2018

[6]مسعود يوسف عياش، تكنولوجيا الطاقة البديلة، سلسلة عالم المعرفة، الكويت،.1981

[7] A. Smets, K. J. Weeber, R. van Swaaij, and M. Zeman, Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion Technologies, UIT Cambridge, 2016.

[8]سوداني محمد البار، دراسة نظرية لمجمع شمسي أسطواني مقعر ذي غطاء زجاجي، جامعة ورقلة، 2009.

[9]رامي جورج، الطاقات المتجددة ومحطاتها، جامعة اللاذقية، سوريا،.2017

[10]سالم بنموسي، منظومة الطاقة الشمسية، القاهرة،.2012

[11]نبيل شهيد، الطاقة والحياة، المعهد العالي للمهن الشاملة، مسلاتة،.2006

[12] J. Twidell and T. Weir, Renewable Energy Resources, Routledge, UK, 2022.

[13]كاميليا يوسف محمد، الطاقة الكهروشمسية، الإسكندرية، جمهورية مصر العربية،.2016

[14]خلف الله عمر قاسم، نظرية الإشعاع الشمسي، جامعة أوبسالا، السويد،.2021

[15] J. A. Duffie and W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 4th ed., John Wiley & Sons, USA, 2013.

[16]عادل زامل منشد، أثر التوجيه بتأثير أشعة الشمس على التطور العمراني للشوارع التجارية في مدينة بغداد، مجلة المخطط والتنمية، العدد27 ،.2013

[17] D. Y. Goswami, F. Kreith, and J. F. Kreider, Principles of Solar Engineering, 4th ed., CRC Press, USA, 2022.

[18] Y. J. L. Coriton, J.-L. Dufresne, and L. Prieur, Énergie Solaire: Physique et Applications, Dunod, France, 2010.

[19]غازي حجاوي، بادئ الطاقة الشمسية وتطبيقاتها، دار نشر جامعية، الأردن،.2000

[20] R. A. Messenger and J. Ventre, Photovoltaic Systems Engineering, CRC Press, USA, 1999.

[21]رزق محمد قرفول، حساب كمية الإشعاع الشمسي الساعي المباشر الوارد على أسطح مائلة وأفقية وعمودية، جامعة شريف للعلوم الأساسية، اللاذقية،.2019

[22] Google Scholar, ScienceDirect, IEEE Xplore, Sun Path Diagrams, web .

[23]سوداني محمد البار، تحقيق علمي لمركز شمسي أسطواني مكافئ ذي غطاء زجاجي، أطروحة دكتوراه، جامعة ورقلة،.2018 .

[24] Mikhailova I. A., Introduction to Nanoenergy: Tutorial, MPEI, 2011.

[25]أولاد سالم حليمة، تقدير الإشعاع الشمسي في منطقة ورقلة وتأثير طرق التتبع الشمسي وزوايا توجه اللاقط على شدة الإشعاع، مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرباح، ورقلة،.2016

[26] M. Chanon, Homogeneous Photocatalysis, vol. II, John Wiley, New York, 1997.

[27] A. Ångström, Solar and Terrestrial Radiation, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 50, no. 210, pp. 121–125, 1924.

الفصل الثاني : الإشعاع الشمسي و المركزات الشمسية

مقدمة

في ظل أزمة الطاقة التي يشهدها العالم اليوم، يسعى الباحثون إلى إيجاد حلول بديلة وفعّالة. وتتجه أنظار العالم نحو الطاقة الشمسية باعتبارها من أهم مصادر الطاقة المتجددة في القرن الحالي، فهي طاقة نظيفة، صديقة للبيئة، ولا تنضب ما دامت الشمس مشرقة. وتعتمد أنظمة التركيز الشمسي على إنتاج البخار وتوليد الكهرباء من الطاقة الشمسية عوضًا عن المصادر الأحفورية. [1] في هذا الفصل، سنتعرف على الإشعاع الشمسي وعلى أنظمة المركزات الشمسية وأنواعها، ثم نتطرق إلى دراسة نظرية للمجمع الشمسي الأسطواني ذي القطع المكافئ، الذي يُعد من أبرز أنظمة التركيز الشمسي.

1.2 الإشعاع الشمسي:

الإشعاع الشمسي هو الطاقة الصادرة عن الشمس، والتي تصل إلى سطح الأرض على شكل أشعة كهرومغناطيسية بسرعة الضوء خلال زمن يقدَّر بـ 499 ثانية (أي نحو 8 دقائق و19ثانية)[2] يتميّز الإشعاع الشمسي بعدد من الخصائص أهمها :

طيف الإشعاع الشمسي، إذ يتكوّن من أطوال موجية متعددة تتوزع طاقتها بين الإشعاع المرئي والأشعة تحت الحمراء.

الجدول (2–1):الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض .**[3]**

المجال	الطول الموجي(λ) μm)	النسبة التقريبية للطاقة الكلية	شدة الإشعاع W/m²
الأشعة فوق البنفسجية**VI**	[0.38-0]	% 7	95
الأشعة المرئية**Visible**	[0.78-0.38]	% 47.3	640
الأشعة تحت الحمراء**IR**	[4 -0.78]	% 45.7	618

- **ثابت الإشعاع الشمسي :هو معدل تدفّق الطاقة الشمسية الذي يصل إلى وحدة المساحة الواقعة عموديًا على أشعة الشمس خارج الغلاف الجوي، ويُعبَّر عنه بالعلاقة :**

$$I= 1367\left[1+0.034\cos\left(N_j\frac{360}{365}\right)\right] \qquad (1\text{-}2)$$

- **الإشعاع الشمسي الكلي** :هو مجموع الإشعاع الشمسي المباشر والإشعاع المنتشر، أي إجمالي الطاقة الإشعاعية التي تصل إلى سطح الأرض.
- **الزوايا الشمسية** :من أبرزها زاوية الانحراف الشمسي (**δ**) وزاوية الساعة الشمسية(**ω**) ، اللتان تُعدّان من المعاملات الأساسية في حساب موضع الشمس في السماء وتقدير شدة الإشعاع الساقط على الأسطح المختلفة.

2.2 استخدامات الطاقة الشمسية:

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

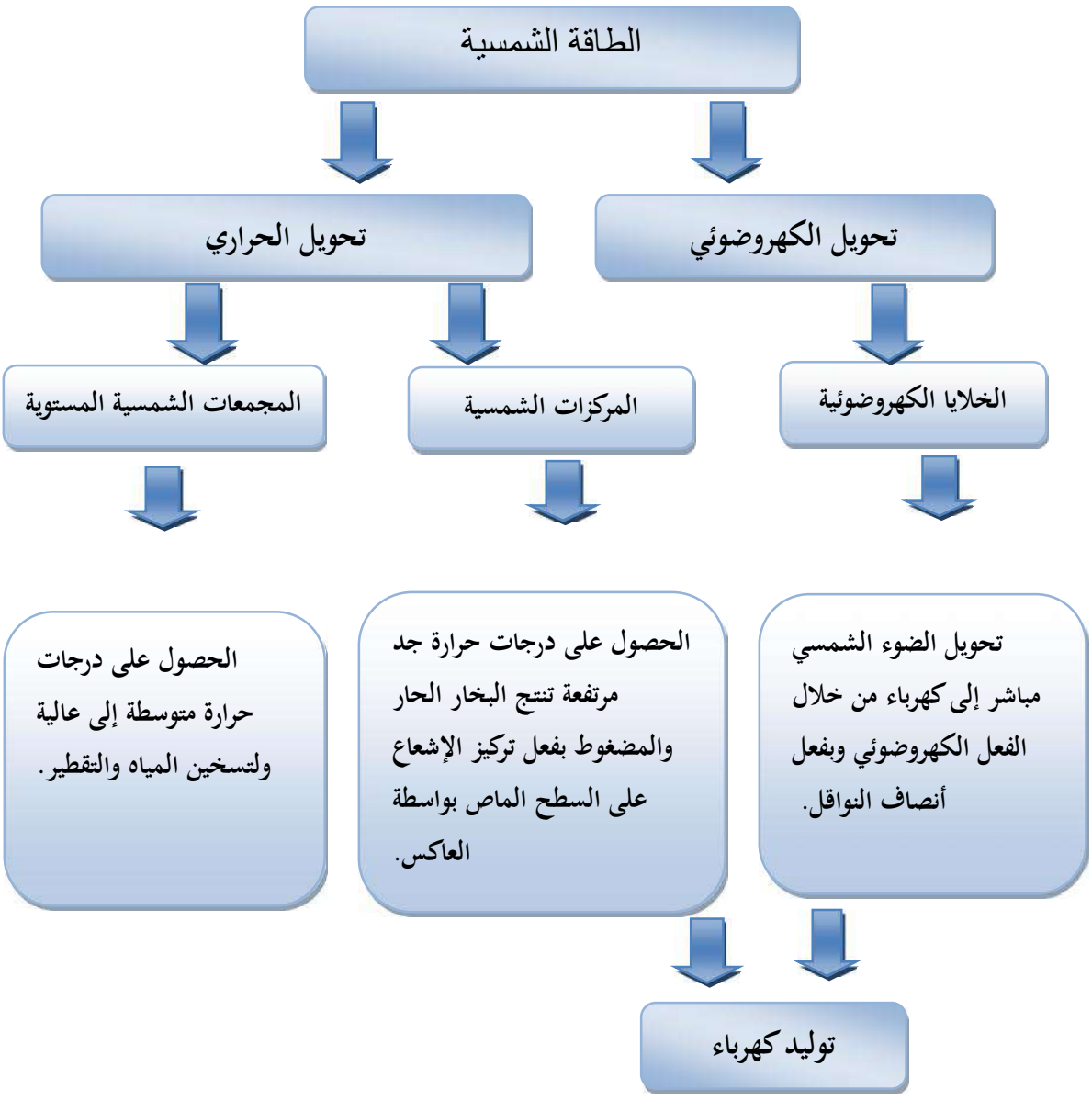
2. 1.2 الاستخدامات الحرارية :

تُستغل الطاقة الشمسية حراريًا بتحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة حرارية عبر المجمعات الشمسية والمواد الماصة للحرارة [2].

- **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 [2].
- **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 تُستخدم 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.



الشكل(2–1): مخطط استخدامات الطاقة الشمسية.[7]

3.2 الخلايا الشمسية و الألواح الشمسية

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

1.3.2 الخلايا الشمسية:(Photovoltaic Cells)

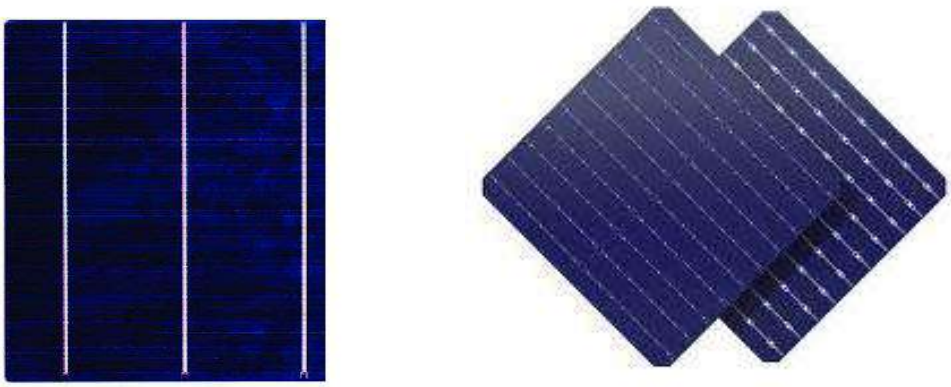
تُعتبر الخلية الشمسية الوحدة الجوهرية لتحويل الضوء (أشعة الشمس) إلى كهرباء عبر عملية تُعرف بـ **التأثير الكهروضوئي**، حيث تمتص مادة شبه موصلة (غالبًا السيليكون) الضوء الساقط عليها، مما يؤدي إلى تحرير الإلكترونات وتوليد تيار كهربائي.

2.3.2 أنواع الخلايا الشمسية:

* الخلايا الشمسية السيليكونية:(Silicon Solar Cells)

تنقسم إلى نوعين رئيسيين:

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



الشكل (2–2) خلايا أحادية البلورة و متعددة البلورات

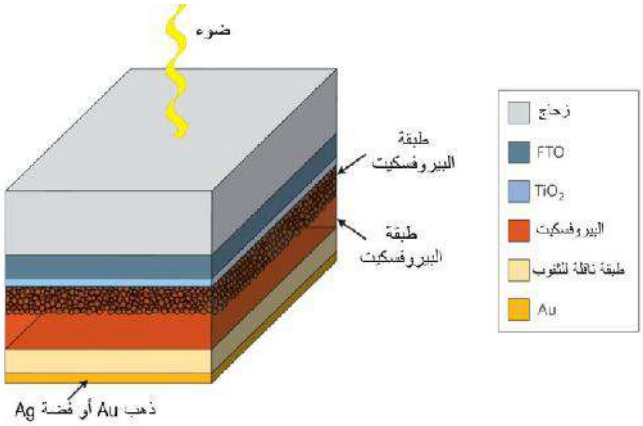
- **الخلايا ذات الفيلم الرقيق:(Thin–Film Solar Cells)**

تُصنَع من مواد شبه موصلة مثل كادميوم تلوريد (CdTe) أو السيليكون غير المتبلور(a–Si) ، وتمتاز بخفة وزنها وسهولة تركيبها، لكنها أقل كفاءة نسبيًا.

الشكل (2–3) الخلايا ذات الفيلم الرقيق

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

تعدّ 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 (2–4) خلايا البيروفسكايت. الشمسية

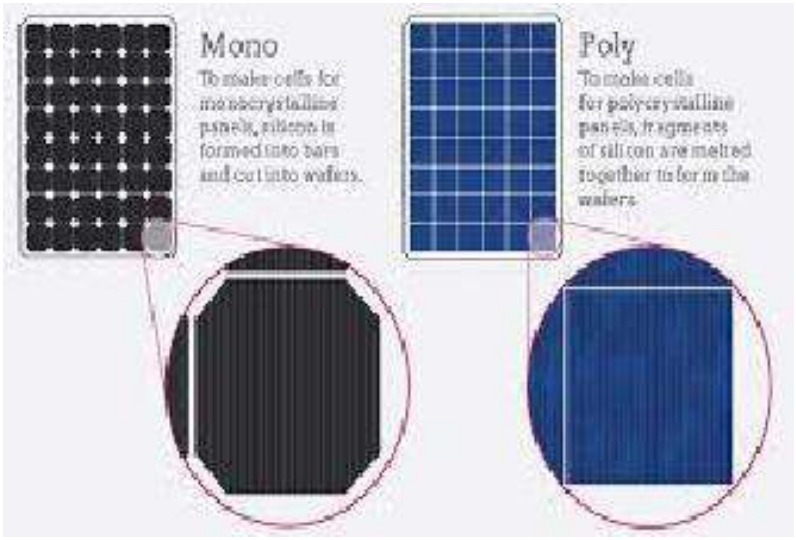
4.2.الألواح الشمسيةSolar Panels)

الألواح الشمسية (Solar Panels) تتكوّن من مجموعات من الخلايا الشمسية الموصولة معًا لتشكيل وحدة متكاملة قادرة على توليد كميات أكبر من الطاقة الكهربائية.

1.4.2 أنواع الألواح الشمسية:

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

تتكوّن من خلايا مصنوعة من سيليكون أحادي البلورة، وتتميّز بكفاءتها العالية التي تتراوح بين 18% و22%، وبمظهرها الأسود المتجانس. تُعدّ من أكثر الأنواع شيوعًا في الأنظمة السكنية والتجارية.



.

الشكل (2–5) الألواح الشمسية الأحادية البلورة

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

تُصمَّم 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 (2–6) الألواح الشمسية ذات نصف الخلية

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

تُدمج هذه الألواح في هيكل المبنى نفسه، مثل الأسقف أو الواجهات الزجاجية، لتُشكّل جزءًا من التصميم المعماري، وتُعدّ حلاً مبتكرًا وفعّالًا 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.

5.2 الخلايا الشمسية المتطورة

الخلايا الشمسية المتطورة تمثّل الجيل الجديد من تقنيات تحويل الطاقة الشمسية، إذ تهدف إلى رفع الكفاءة وتقليل التكلفة وتحسين الأداء في ظروف التشغيل المختلفة

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

تُستخدم في هذه الخلايا مواد نانوية لتعزيز كفاءة تحويل الضوء إلى كهرباء، حيث تسمح البنى النانوية بامتصاص أكبر لكمية الإشعاع وتحسين حركة الإلكترونات داخل الخلية.

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

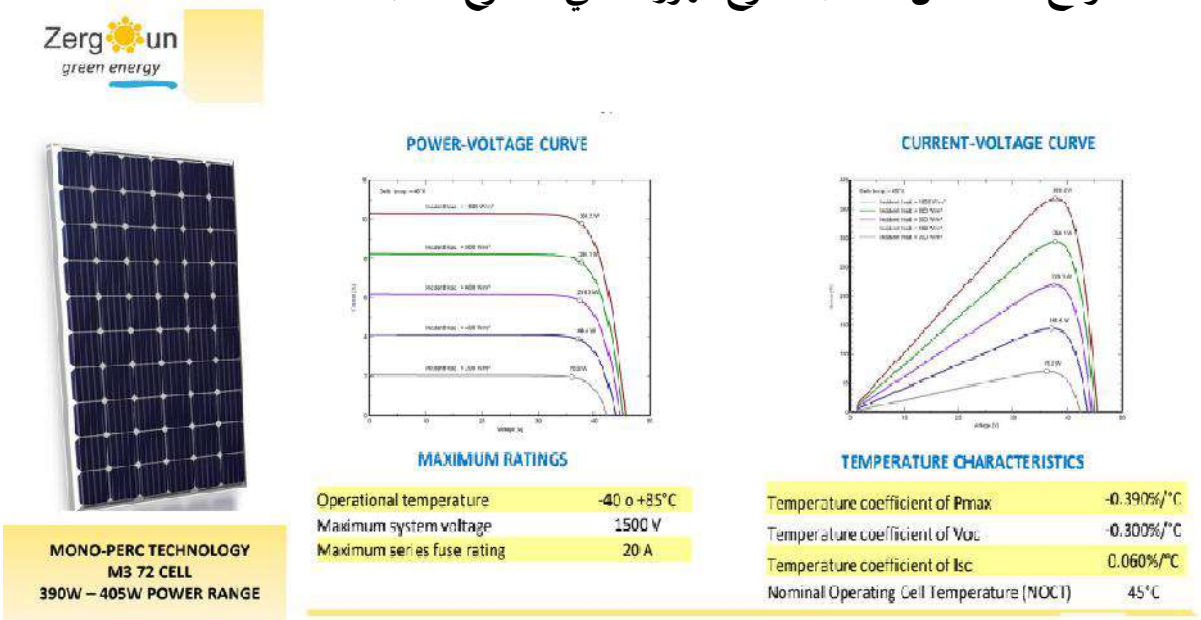
تُعد من أحدث الابتكارات في مجال الطاقة الشمسية، وتمتاز بقدرتها الكبيرة على امتصاص الضوء، إضافة إلى كفاءتها العالية مقارنة بالخلايا السيليكونية التقليدية. كما تمتاز بإمكانية تصنيعها بتكلفة منخفضة نسبيًا، مما يجعلها خيارًا واعدًا لتقنيات المستقبل.

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

تشمل هذا النوع من الخلايا متعددة الطبقات (Multi-Junction Solar Cells) القادرة على امتصاص نطاق أوسع من طيف الإشعاع الشمسي، ما يتيح تحقيق كفاءة أعلى بكثير من الخلايا التقليدية أحادية الطبقة

-
-

6.2 نموذج لخصائص صناعية للوح كهروشمسي مصنوع محليا



الشكل (2–7) اللوح الكهروضوئي المصنوع محليًا في مؤسسة زرقون للطاقة الخضراء – الرويسات، ورقلة (الجزائر)

تُنتَج هذه الألواح في مؤسسة زرقون للطاقة الخضراء، حيث يُركَّب في كل لوح 72 خلية شمسية لتوليد قدرة كهربائية تصل إلى **400واط** بجهد **48فولط** وتيار **10أمبيرات**.

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

7.2 المركزات 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، والنحلية، والتطبيقات الصناعية الحرارية، خاصة في المناطق ذات الإشعاع الشمسي المرتفع .[7]

8.2 أنواع المركزات

1.8.2مركزات البؤرة النقطية:

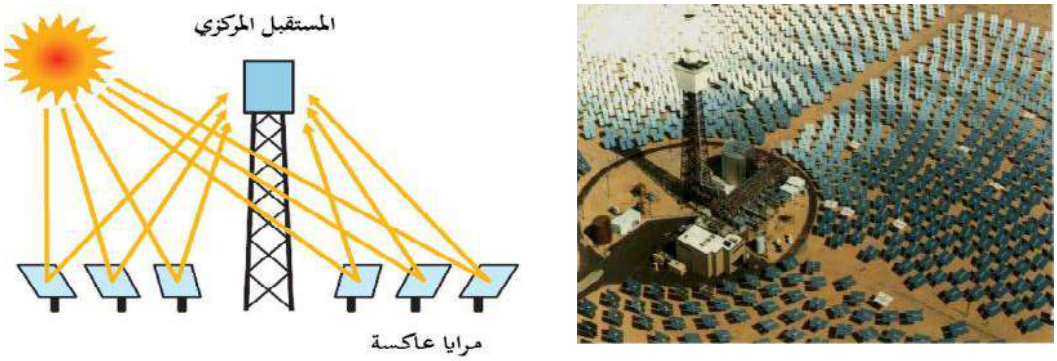
هي المركزات التي تُوجَّه فيها الأشعة الشمسية نحو بؤرة نقطية واحدة، حيث يُثبت فيها المستقبل الذي يقوم بتحويل الطاقة الشمسية المركّزة إلى طاقة حرارية. **[8]**

1.1.8.2 نظام برج الطاقة المركزي (CRS)

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

تُزوَّد هذه المرايا بنظام تتبّع شمسي مزدوج المحور لضمان توجيه مثالي لأشعة الشمس على مدار اليوم.

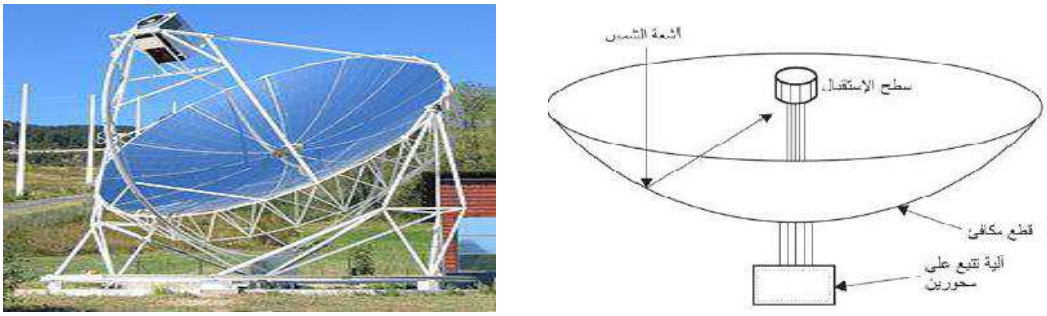
تُحوَّل الطاقة الشمسية المركّزة في المستقبل إلى حرارة تنتقل إلى مائع ناقل للحرارة)غالبًا أملاح منصهرة)، يُستخدم بدوره لتوليد بخار يُدير توربينًا لإنتاج الطاقة الكهربائية عبر دورة حرارية (تيرموديناميكية [9]



الشكل (2–8): يوضح نظام برج الطاقة المركزي [11،10]

2.1.8.2 نظام الصحن ذي القطع المكافئ:(Dish Parabolic System DP)

يتكوّن 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 1500درجة مئوية، مما يجعله من أكثر تقنيات التركيز الشمسي كفاءة من حيث تحويل الطاقة الحرارية إلى كهربائية[12].



الشكل (2–9): يوضح نظام الصحن ذي القطع المكافئ.**[12]**

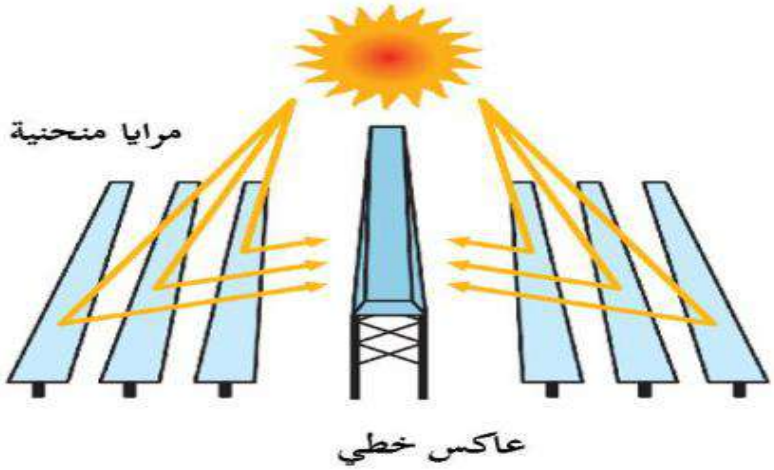
2.8.2 مركزات البؤرة الخطية:

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. [8]

1.2.8.2 نظام مركزات فرينل (Linear Fresnel Reflectors)

تُعدّ مركزات فرينل الخطية من التقنيات الحديثة في مجال الطاقة الشمسية المركّزة، 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 مقارنةً بالأنظمة المقعّرة التقليدية



الشكل (2–10): مركزات أشعة فرينل

2.2.8.2 المجمع الشمسي الأسطواني ذي القطع المكافئ (Parabolic Trough Collector – PTC):

المجمع الشمسي الأسطواني ذي القطع المكافئ أحد أكثر أنظمة التركيز الشمسي انتشارًا، حيث يُستخدم لتسخين السوائل بواسطة الإشعاع الشمسي المركّز .يتكوّن 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 (مثل الماء أو الزيت.(تصل درجة حرارة السائل داخل الأنبوب إلى نحو **400 درجة مئوية**، مما يجعله

مناسبًا لتوليد البخار وتشغيل التوربينات الحرارية [13] [14].

الشكل (2 –11): المجمع الشمسي الأسطواني القطع مكافئ.**[14]**

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

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

1.9.2 المكونات الأساسية لـ :(**PTC**)

يتكوّن 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 .

1.1.9.2 العاكس :

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

2.1.9.2 العنصر الجامع للحرارة(Heat Collector Element – HCE) :

الأنبوب الجامع للحرارة أحد أهم مكونات النظام، إذ يُوضَع على الخط البؤري للعاكس ويُصنع عادة من النحاس أو الفولاذ المقاوم للصدأ.يُغطَّى سطحه الخارجي بطبقة انتقائية لتحسين **الامتصاصية الضوئية** وتقليل **الخسائر الحرارية** الناتجة عن الإشعاع أو الحمل.[10].

3.1.9.2 المائع الناقل للحرارة (Heat Transfer Fluid – HTF):

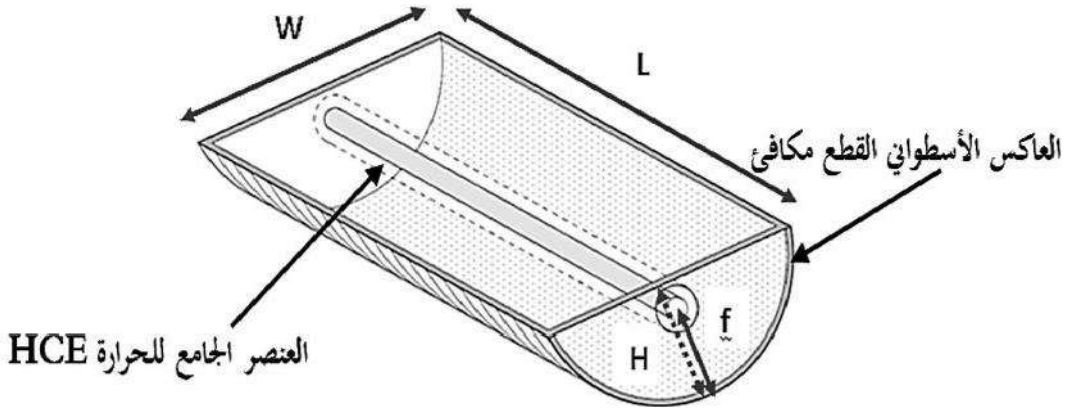
يُعتبر المائع الناقل للحرارة مكوّنًا أساسياً في أنظمة الطاقة الشمسية الحرارية، حيث يقوم بنقل الطاقة من المجمع الشمسي إلى نظام إنتاج الكهرباء أو التخزين الحراري .تشمل الموائع الأكثر استخدامًا :**الهواء، الماء، الأملاح** المنصهرة، الزيوت الهيدروكربونية، وأخيراً الموائع النانوية الحديثة.

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.

10.2 هندسة 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[9]



الشكل (2–12): *المخطط العام للمجمع الشمسي الأسطواني ذي القطع المكافئ* لPTC

1.10.2 معادلة الشكل :

تعطى معادلة الشكل للقطع مكافئ بالمعادلة التالية:[10]

$$y = \frac{1}{4.f}x^2 \qquad (5-2)$$

حيث f:البعد البؤري

تُحدَّد أبعاد المجمع (PTC) بالمعاملات التالية

- الطول L
- عرض الفتحةw
- ارتفاع حافة العاكس h_c
- و حافتي العاكس تتميز بالإحداثيات الديكارتية $(x= \pm \frac{w}{2}, y = h_c)$.

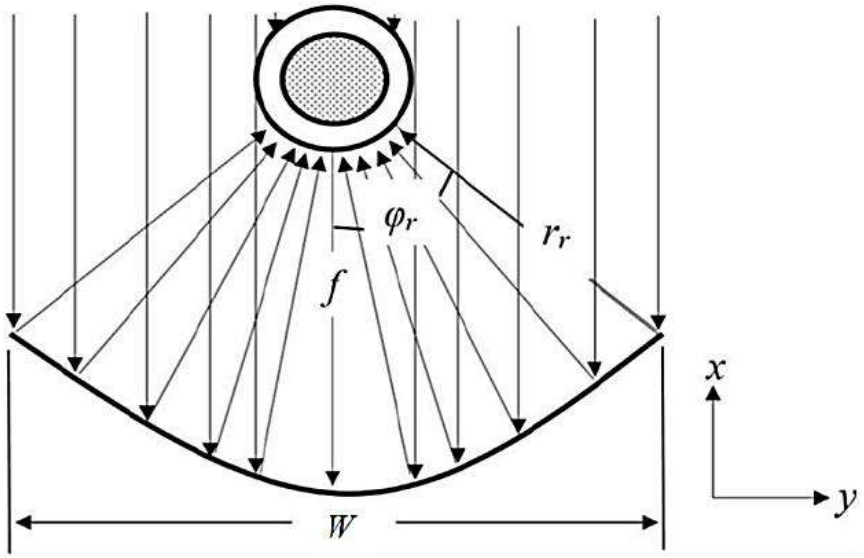
2.10.2 البعد البؤري f:

عند تعويض إحداثيات الحافة في المعادلة الديكارتية، يمكن اشتقاق تعبير البعد البؤري **f**بدلالة أبعاد المجمع [9]

يُكتب البعد البؤري بطريقتين رياضيتين مختلفتين :

$$f= \frac{w^2}{16h_c} \qquad (6-2)$$

$$f = \frac{w}{4.\tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)} \qquad (7-2)$$



الشكل (2-13): *يوضّح زاوية الحافة وزاوية القبول للمجمع الشمسي[15]*

حيث $\emptyset_r$: زاوية الحافة الزاوية المحصورة بين محور التناظر (Oy) والخط الواصل بين البؤرة وحافة العاكس، وتُحسب بالعلاقة التالية: [10]

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

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

$$r = \frac{2f}{1+\cos\emptyset_r} \qquad (9-2)$$

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

$$r_r = \frac{2f}{1+\cos\emptyset_r} \qquad (10-2)$$

3.10.2 مساحة الفتحة A_{ap}:

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

$$A_{ap} = W.L \qquad (11-2)$$

تحسب المساحة الخارجية للأنبوب الماص بالعلاقة:

$$A_{ro} = \pi.D_{ro}.L \qquad (12-2)$$

4.10.2 التركيز الهندسي (Geometric Concentration)

التركيز الهندسي هو النسبة بين شدة الإشعاع الشمسي المركّز على الخط البؤري وشدة الإشعاع الشمسي المباشر الساقط على فتحة المجمع [10].

$$CR = \frac{A_{ac}}{A_{ro}} \qquad (13-2)$$

11.2 المردود 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)

ويُعبَّر عن المردود الضوئي بالعلاقة التالية. [10]

:

$$\eta_{op} = \rho^{\circ}.\tau_c.\tau_e.a_r.\gamma\ 1 - A_f.\tan\theta]\cos\theta \qquad (14-2)$$

12.2 أنظمة تتبع المركز الأسطواني ذي القطع المكافئ:(PTC) :

للاستفادة القصوى من الإشعاع الشمسي المباشر في التطبيقات الحرارية والكهروضوئية، لا بد من استخدام **أنظمة تتبع شمسي** تُوجّه فتحة المجمع باستمرار نحو مسار الشمس، بحيث تبقى الأشعة الشمسية عمودية أو شبه عمودية على السطح طوال فترة التشميس.[8]

2-12-1 التتبع الشمسي ثنائي المحور:

في هذا النظام، يتحرك المجمع الشمسي حول محورين :**محور رأسي** يتبع الارتفاع الشمسي، و**محور أفقي** يتبع سمت الشمس .تتيح هذه الآلية الحفاظ على سقوط الأشعة بشكل عمودي على سطح الفتحة، **مما يُلغي** زاوية الورود ويحقق **أعلى مردود ضوئي ممكن**.[16]

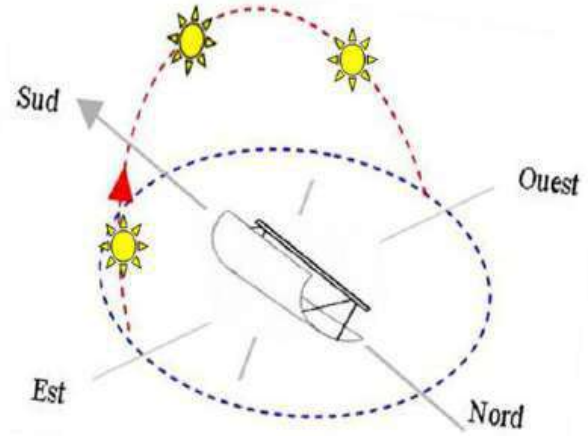
2.12.2 التتبع الشمسي أحادي المحور:

يعتمد هذا النوع من التتبع على محور واحد فقط، حيث تتحرك المجمعات عموديًا وفق ارتفاع الشمس للحفاظ على توجيه مثالي . يؤدي هذا النظام إلى **تحسين المردود الضوئي** مع تقليل التعقيد الميكانيكي مقارنة بالتتبع المزدوج.يُمكن تنفيذ التتبع الأحادي بثلاثة اتجاهات رئيسية.[9]

- **شرق – غرب(East–West)**
- **شمال – جنوب(North–South)**
- **شرق – غرب قطبي(Polar East–West)**

في حالة توجيه أنبوب الاستقبال **شمال–جنوب** مع تتبع شمسي **شرق–غرب**، تُحسب زاوية السقوط بالعلاقة التالية: [9]

$$\cos\theta = \sqrt{(\cos\delta \sin\varphi \cos\omega - \cos\delta \cos\omega)^2} \qquad (15_2)$$

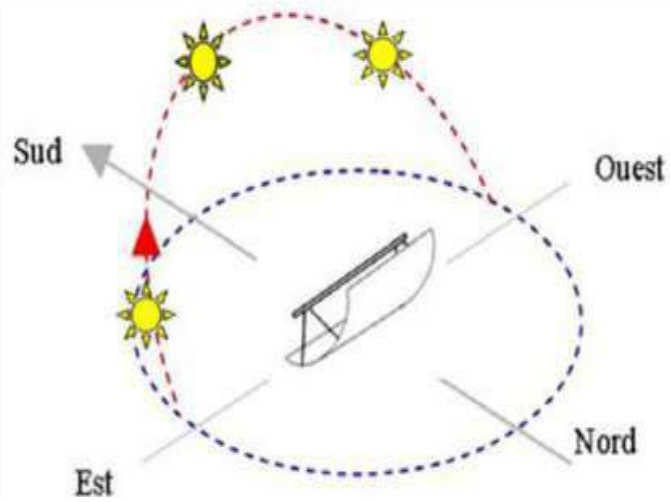


الشكل(2–14):تتبع شمسي(شرق_ غرب)لمركز قطع مكافئ أسطواني .**[17]**

- **في حالة توجيه أنبوب الاستقبال** شرق–غرب **مع تتبع شمسي** شمال–جنوب، **تُعطى زاوية السقوط بالعلاقتين التاليتين** [9]

$$\cos\theta = \sqrt{1 - \cos^2\delta \sin^2\omega} \qquad (16_2)$$

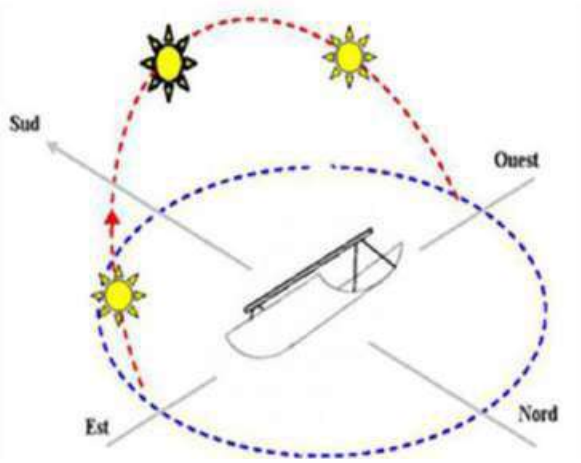
$$\cos\theta = \sqrt{\sin^2\delta - \cos^2\delta \sin^2\omega} \qquad (17–2)$$



الشكل(2–15): تتبع شمسي شمال _جنوب لمركز قطع مكافئ أسطواني**[17]**

- **أما في حالة توجيه أنبوب الاستقبال** شمال–جنوب **مع تتبع شمسي** شرق–غرب قطبي، **فتعطى**
- **زاوية السقوط بالعلاقة** **[9]**

$$\cos\theta = \cos\delta \qquad (18_2)$$



الشكل (2–16): تتبع شمسي شرق _غرب قطبي لمركز قطع مكافئ أسطواني. **[17]**

3.12.2 حالة عدم التتبع (تثبيت اللاقط الشمسي:

في حالة التثبيت الثابت للمجمع الشمسي، تعتمد زاوية السقوط بين الشعاع الشمسي والناظم على سطح الفتحة على مجموعة من العوامل الجغرافية والفلكية، وهي:

- دائرة خط العرض للمنطقة،
- زاوية الانحراف الشمسي،
- زاوية الساعة الشمسية،
- زاوية ميل سطح المجمع عن الأفق،
- زاوية السمت.

وتُعطى العلاقة الرياضية لزاوية السقوط كما يلي: [9]

$$\cos\theta = \sin\varphi\,(\sin\delta\,.\cos\beta + \sin\delta\,.\cos\omega\,.\cos w\,.\sin\beta) + \cos\varphi\,(\cos\delta\,.\cos w\,.\cos\beta - \sin\delta\,.\sin a\,.\sin\beta) + (\cos\delta\,.\sin a\,.\sin w\,.\sin\beta) \qquad (19\text{–}2)$$

وعندما يكون سطح الفتحة أفقيًا، تُصبح زاوية الورود[9]

$$\cos\theta = \sin\varphi\,.\sin\delta + \cos(\varphi-\beta).\cos\delta\cos\omega \qquad (20\text{–}2)$$

عند توجيه المجمع نحو الجنوب مع ميل معين عن الأفق، فإن زاوية الميل تُعطى بالعلاقة [9]

$$\cos i = \sin(\varphi-\beta)\,.\sin\delta + \cos(\varphi-\beta)\,.\cos\delta.\cos\omega \qquad (21\text{–}2)$$

13.2 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.

1.13.2 ا الحرارة المفيدة Q_u :(Useful Heat)

الحرارة المفيدة هي التي يكتسبها المجمع PTCمن خلال الفرق بين **درجات حرارة المائع عند المخرج والمدخل**HTF، أي كمية الحرارة المنتقلة إلى المائع أثناء مروره داخل الأنبوب الماص[10]

$$Q_u = m_f . C_p . (T_{out} - T_{int}) \qquad (22-2)$$

2.13.2 الإشعاع الشمسي المعترض:(Incident Solar Radiation)

هي كمية الإشعاع الشمسي المباشر التي تسقط على **فتحة المجمع الشمسي** (**PTC**) خلال فترة التشغيل، وتُحسب بالعلاقة التالية [10]:

$$Q_s = A_{ac} . G_B \qquad (23-2)$$

3.13.2 الكفاءة الحرارية η_{th} :(Thermal Efficiency)

تُعرَّف الكفاءة الحرارية بأنها النسبة بين الحرارة المفيدة المكتسبة من المجمع الشمسي والإشعاع الشمسي المباشر الساقط على فتحة المجمع، وتُعبَّر عنها بالعلاقة: [10]

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_s . \eta_{op}} \qquad (24-2)$$

14.2 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[18] [9]

$$\square_{st} = \emptyset_e - \square_s + \emptyset_g \qquad (25-2)$$

حيث :

$\square_{st}$:التدفق الحراري المخزن

$\square_s$:التدفق الحراري الخارجي

$\square_e$:التدفق الحراري الداخلي

$\square_g$:التدفق الحراري المتوالد

1.14.2 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:[9] :[19]

$$\rho_r . A_r . Cp_r . \frac{dT_r}{dt} = I . C_g . \tau_e . \rho^{\circ} . \tau_e . a_r . \pi . D_{ext} + \left(h_{conv(r \to f)} + h_{conv(r \to e)}\right)(T_e - T_r)\pi . Dr_{ext} + h_{conv(r \to f)}(T_f - T_r)\pi . Dr_{int} \qquad (26_2)$$

Ar : مساحة مقطع جدار الأنبوب الماص :

$$\mathbf{Ar} = \frac{\pi}{4}\left(Dr_{ext}^2 - Dr_{int}^2\right) \qquad (27\text{–}2)$$

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

$$h_{rad(e \to r)} = \frac{\sigma(T_r + T_e)\left(T_r^2 + T_e^2\right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_e}\left(\frac{Dr_{ext}}{De_{int}}\right)} \qquad (28\text{–}2)$$

2.14.2 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: [9]

$$\rho_f . A_f . Cp_f \frac{dT_f}{dt} = h_{conv(r\to f)} (T_r - T_f) \pi . Dr_{int} \qquad (29-2)$$

A_fمساحة مقطع الأنبوب الماص :

$$A_f = \frac{\pi}{4} Dr_{int}^2 \qquad (30-2)$$

معامل انتقال الحرارة بين الأنبوب الماص والمائع HTF

$$h_{conv(r\to f)} = \frac{Nu_{rf\lambda f}}{Dr_i} \qquad (31-2)$$

مساحة التبادل الحراري بينهما:

$$Ar_{int} = \pi . Dr_{int} . L \qquad (32-2)$$

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

$$Re_D \leq 2300$$

$$Nu_f = 4.36$$

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

بـ $Re_D \geq 2300$ و 5.10^5 و $0.5 \leq P_r \leq 2000$ وفق العلاقة:

$$Nu_f = \frac{\left(\frac{c_f}{2}\right)(R_{eD}-1000)P_r}{1+12.7\left(\frac{c_f}{2}\right)^{1/2}\left(P_r^{2/3}-1\right)} \left(\frac{Pr}{Pr_w}\right) 0.11 \qquad (33-2)$$

تعطى عبارة رينولدز عند قطر الأنبوب الماص :

$$Re_D = \frac{V_f . \rho_f . Dr_i}{\mu_f} \qquad (34-2)$$

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

معامل الاحتكاك C_f في حالة أنابيب ملساء :

$$C_f = (1.58 \ln Re_D - 3.28)^{-2} \qquad (35_2)$$

3.14.2 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: [20] [10]

$$\rho_e . A_e . Cp_e \frac{dT}{dt}$$

$$h_{conv(e \to amb)}(T_{amb} - T_e)\pi . De_{ext} + h_{rad(e \to c)}(T_c - T_e)\pi . De_{ext} \qquad (36_2)$$

تحسب كل من :

مساحة مقطع جدار الظرف الزجاجي .

$$A_e = \frac{\pi}{4}\left(De_{ext}^2 - De_{int}^2\right) \qquad (37_2)$$

درجة حرارة السماء بالعلاقة :

$$T_c = 0.0552(T_a)^{1.5} \qquad (38_2)$$

درجة حرارة الجو المحيط بالعلاقة :

$$T_a = \left[\frac{T_{aMax} - T_{aMin}}{2}\right] \sin\left[\frac{(t-8)\pi}{12}\right] + \left[\frac{T_{aMax} + T_{aMin}}{2}\right] \qquad (39_2)$$

T_{aMax} :درجة حرارة الجوي المحيط القصوى

T_{aMin} :درجة حرارة الجوي المحيط الدنيا

t :التوقيت المحلي معبر عنه بالساعات ، نعتبر درجة حرارة الهيكل المعدني هي درجة حرارة الجو المحيط.**[9]**

15.2 التخزين الحراري:(Thermal Energy Storage)

التخزين الحراري هو عملية حفظ الطاقة الحرارية لاستخدامها في وقت لاحق، سواء في التدفئة أو التبريد أو في توليد الكهرباء. تُصنَّف أنظمة التخزين الحراري إلى ثلاثة أنواع رئيسية:[18]:

1.15.2 التخزين على شكل حرارة محسوسة (Sensitive Heat):

في هذا النوع، تُخزَّن الطاقة الحرارية عن طريق **رفع أو خفض درجة حرارة مادة التخزين** دون تغيير حالتها الفيزيائية. يمكن أن تكون مادة التخزين صلبة مثل **الحصى**، أو سائلة مثل **الزيوت الهيدروكربونية** ..[10]

2.15.2 التخزين على شكل حرارة كامنة(Latent Heat) :

في هذا النوع، تُخزَّن الطاقة الحرارية عبر **تغيّر الحالة الفيزيائية للمادة**)من صلبة إلى سائلة أو العكس. يُعدّ هذا النوع أكثر كفاءة من التخزين الحسي، حيث يمكن تخزين كميات أكبر من الطاقة في حجم أقل، ومن أشهر مواده **الأملاح المنصهرة**.[10]

3.15.2 التخزين الكيميائي للحرارة (chemical Heat) :

يعتمد هذا النظام على **التفاعلات الكيميائية القابلة للعكس** لتخزين الحرارة و استرجاعها عند الحاجة. يختلف هذا النوع حسب كمية الحرارة التي يمكن تخزينها لكل وحدة من وسط التخزين ،وكذلك درجات حرارة التخزين .[9] [20]

الخاتمة

من خلال دراسة الإشعاع الشمسي وأنواعه وزواياه المختلفة، تتبيّن لنا الأهمية الكبيرة لاستغلال الطاقة الشمسية في تلبية احتياجات العالم المتزايدة من الطاقة.إنّ تقنيات تحويل الإشعاع الشمسي بأنواعه، ومعرفة الزوايا الهندسية المؤثرة في كمية الإشعاع الساقط، تُعدّ من العوامل الأساسية لتحقيق **أعلى كفاءة ممكنة** في استثمار هذه الطاقة، خصوصًا في المناطق ذات الإشعاع المرتفع مثل منطقتنا .

وتُعتبر **المركزات الشمسية** بمختلف أشكالها — سواء كانت خطية أو نقطية أو أسطوانية ذات قطع مكافئ — من **الأنظمة المحورية** في تطبيقات الطاقة الشمسية المركّزة(CSP) ، لقدرتها على **تركيز الإشعاع وتحويله إلى حرارة عالية** تُستخدم لتوليد الكهرباء أو لأغراض صناعية أخرى

وتشير الدراسات إلى أنّ **الأنظمة الهجينة** (**CPVT**) ستشهد انتشارًا واسعًا في المستقبل القريب، إذ أظهرت أنّ دمج تقنيات **CSP**و **PV** يساهم في رفع كفاءة الأنظمة الكهروشمسية الحرارية، وتخفظ من التكاليف الإجمالية،[20] .

وعليه فان دمج المركزات الشمسية مع الألواح الكهروضوئية في أنظمة هجينة يجمع بين إنتاج الكهرباء والحرارة في آن واحد يُعدّ من الحلول الواعدة لتحقيق إنتاج طاقة نظيفة ومستدامة.

المراجع

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

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

[3] محمدأحمدالسيدخليل ، الطاقةالشمسيةواستخداماتها– –دارالكتب العلمية للنشر والتوزيع القاهرة،2004

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

[5]د كاميليا يوسف محمد ، الطاقة الكهروشمسية ، الإسكندرية – جمهورية مصر العربية – أكتوبر 2016

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

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

[8]عيادي عائشة، دراسةالمركز الشمسي لضخ الإشعاع الشمسي لغرض التطبيقات الإلكترونية الضوئية تخصص كاشف وبصريات إلكترونية ،جامعة قاصدي مرباح ورقلة 2023.

[9]سوداني محمد البار ،تحقيق عملي لمركزشمسي أسطواني مكافئ ذي غطاء زجاجي ، جامعة قاصدي مرباح ورقلة 2018.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

الفصل الثالث

نظام التهجين الكهروضوئي – تركيز شمسي - حراري

مقدمة:

يهدف نظام التهجين الكهروضوئي – تركيز شمسي – حراري إلى تحقيق أقصى استفادة ممكنة من الطاقة الشمسية، من خلال تحويلها في الوقت نفسه إلى طاقة كهربائية وحرارية، مما يساهم في رفع كفاءة استخدام الطاقة وتقليل الفاقد منها. وتتميز هذه التقنية بقدرتها على تقديم حلول طاقة متكاملة تلبي احتياجات متنوعة في المجالات السكنية والصناعية على حد سواء.

تُعد هذه الأنظمة من التقنيات المتقدمة التي تستغل الطاقة الشمسية عبر دمج ثلاث تقنيات رئيسية هي:

- **الطاقة الكهروضوئية** :(**PV**) تعتمد على الخلايا الشمسية لتحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية.
- **التركيز الشمسي** :(**CSP**) يستخدم المرايا أو العدسات لتركيز ضوء الشمس على مستقبل حراري لإنتاج حرارة عالية.
- **التهجين الحراري** :يتم فيه استغلال الحرارة الناتجة عن عملية التركيز الشمسي لتبريد الخلايا الكهروضوئية، مما يزيد من كفاءتها، كما يمكن استخدام هذه الحرارة في تطبيقات أخرى مثل التدفئة أو تحلية المياه[1].

ويقوم مبدأ التهجين على أن الخلية الشمسية تُحوّل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية بأعلى كفاءة ممكنة تتراوح بين 9% و12%، وذلك حسب نوع الخلايا الشمسية المستخدمة وظروفها الحرارية.

لا يتحول أكثر من 20% من الإشعاع الشمسي الساقط على الخلايا الكهروضوئية إلى كهرباء، بينما يتحول الباقي إلى طاقة حرارية، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الخلية الكهروضوئية وبالتالي انخفاض كفاءتها الكهربائية.[2].

يُعرّف نظام التهجين بأنه دمج بين المكونات الكهروضوئية (PV) والمكونات الحرارية (T) لإنتاج الكهرباء والطاقة الحرارية في آن واحد. ويُعد هذا الدمج وسيلة فعالة لتحقيق إنتاج مزدوج للطاقة الكهربائية والحرارية، إذ تنتج المجمعات الكهروضوئية–الحرارية (PV/T) طاقة أكبر لكل وحدة مساحة مقارنة بالوحدات الكهروضوئية التقليدية المنفصلة، كما أن هذا النظام مناسب للتطبيقات التي تكون فيها المساحات المتاحة محدودة.

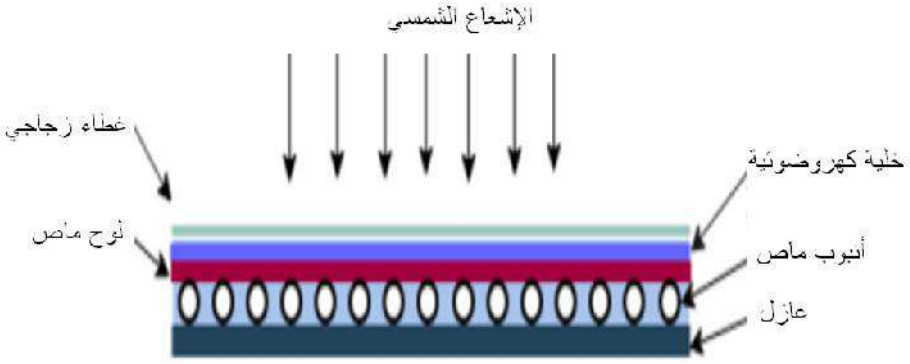
تعمل أنظمة (PV/T) في بيئة خالية من الضوضاء، وتتميز بانخفاض تكاليف صيانتها إلى حد كبير[2]. وتبقى مسألة رفع كفاءة الخلايا الشمسية، التي تنخفض بسبب ارتفاع حرارتها الناتجة عن الإشعاع الشمسي، مرتبطة بفعالية المبادلات الحرارية التي تعمل على تبريدها لتوفير أداء أفضل، مع إمكانية استغلال المائع الساخن الخارج من المبادل في استخدامات أخرى [3]

1.3 تعريف المبادلات الحرارية

تُعد المبادلات الحرارية أجهزة تُستخدم لنقل الحرارة من وسط ساخن إلى وسط بارد، وغالبًا ما يتم ذلك بوجود حاجز أو فاصل بين الوسطين. وتوجد أيضًا حالات تنتقل فيها الحرارة بين الموائع دون وجود جدران فاصلة، مثل التقاء الهواء الساخن بالسائل البارد في مبردات المياه الصناعية، وتُعرف هذه الحالة باسم **انتقال الحرارة المباشر** .(**Direct Heat Transfer**) أما النوع الأول، الذي يعتمد على وجود حاجز فاصل بين الوسطين، فهو الأكثر شيوعًا ويُطلق عليه اسم المبادلات الحرارية في الاستخدام العام[9].

2.3 مبدأ عمل نظام التهجين

تُثبَّت المبادلات الحرارية على السطح السفلي الماص للحرارة في الخلية الشمسية، حيث يقوم المبادل بامتصاص الحرارة المنبعثة من السطح، بينما يمر داخله مائع ذو درجة حرارة منخفضة. عند تعرض هذا المائع لسطح الخلية الساخن، يحدث تبادل حراري بينهما، فتَنخفض درجة حرارة الخلية في حين ترتفع درجة حرارة المائع. يؤثر معدل تدفق المائع تأثيراً كبيراً في خفض درجة حرارة الخلية الكهروضوئية(PV) ، إذ كلما زاد معدل التدفق انخفضت درجة حرارة الخلية بسرعة أكبر، مما يساهم في تحسين كفاءتها الحرارية والكهربائية.



الشكل (3–1):يوضح مبدأ عمل جهاز هجين

3.3 التبادل الحراري خلال المبادلات الحرارية

تنتقل الحرارة عادةً من المواد الحارة إلى المواد الباردة، مما يؤدي إلى انخفاض درجة حرارة المواد الحارة وارتفاع درجة حرارة المواد الباردة. ويكون مقدار الحرارة المفقودة مساويًا لمقدار الحرارة المكتسبة مضافًا إليها الحرارة المتسربة إلى الجو، وفق العلاقة التالية:

الحرارة المفقودة = الحرارة المكتسبة + الحرارة المتسربة إلى الجو [9]

يُستخدم المبادل الحراري أساسًا لتحقيق وفرة في استهلاك الطاقة وتقليل التكاليف التشغيلية. فعلى سبيل المثال، يحتاج تسخين النفط الخام إلى كميات كبيرة من الوقود والطاقة، مما يسبب تكاليف مرتفعة، في حين أن المنتجات النفطية الخارجة من عمليات المعالجة تحتاج إلى التبريد قبل نقلها إلى الخزانات. لذلك يمكن دمج عمليتي التسخين والتبريد في مبادل حراري واحد أو في مجموعة من المبادلات لتحقيق الكفاءة الطاقوية.

يُعد **بخار الماء** من أهم وسائط التسخين في الصناعة النفطية، إذ يُستخدم على نطاق واسع في الغلايات لنقل حرارته إلى المنتجات النفطية التي تتحول بعد ذلك إلى ماء مكثف. ويُعاد هذا الماء إلى منظومة مغلقة لاستخدامه مجددًا كماء تغذية للمرجل لإنتاج البخار، علمًا بأن البخار لا يُعد المسخن الرئيس في تكرير النفط الخام، إذ تتم عملية التسخين الأساسية في الأفران [9].

تُعد المبادلات الحرارية من أهم معدات الصناعة والمعالجة الحديثة، فهي تمثل تطبيقًا عمليًا لمفاهيم الفيزياء الحرارية (الثرموديناميكا) وانتقال الحرارة، مما يجعلها عنصرًا أساسيًا في مختلف الصناعات حول العالم.

تُستخدم المبادلات الحرارية في العديد من التطبيقات، منها أنظمة التسخين والتبريد المنزلية، وأنظمة التبريد في السيارات، إضافةً إلى استخدامها الواسع في المجالات الصناعية، كإنتاج الطاقة، والصناعات الكيميائية والبتروكيميائية، وتكرير النفط[9].

4.3 وظائف المبادلات الحرارية

تُصنَّف المبادلات الحرارية تبعًا لوظيفتها والغرض من استخدامها، ويمكن تمييز أهم أنواعها كما يلي:

- **المسخنات:**

وهي المبادلات التي تُستخدم فيها سوائل أو موائع ساخنة لتسخين مائع آخر[9].

- **المبرّدات:**

وهي المبادلات التي تُستعمل لتبريد الموائع بواسطة مائع آخر، وغالبًا ما يُستخدم الماء لهذا الغرض ويُعرف باسم **ماء التبريد**(**Cooling Water**) ، أما في حال استخدام الهواء فيُطلق عليها **المبرّدات الهوائية** .(**Air Coolers**) [9].

- **المكثفات:**

وهي المبادلات الحرارية التي تُستخدم لتكثيف البخار أو مزيج من الأبخرة، وقد تحتوي أحيانًا على غازات قابلة للتكثيف مثل الهواء مع بخار الماء. وتتمثل وظيفتها الرئيسة في إزالة الحرارة الكامنة للتبخر (**Latent Heat**)باستخدام الماء عادةً كوسط تبريد[9].

- **المبخّرات:**

تُستخدم لتبخير المذيبات من المحاليل المختلفة، وغالبًا ما تُستخدم لتركيز المحاليل المائية عبر تبخير الماء منها[9].

- **الغلايات:**

وهي المبادلات الحرارية التي تُستخدم عادةً لتسخين قعور أبراج التقطير أو التجزئة لفصل المكونات المختلفة، ويُستعمل بخار الماء على نطاق واسع في هذه التطبيقات،خصوصًا في الصناعات النفطية. [9]

5.3 تصنيف المبادلات الحرارية

تختلف المبادلات الحرارية تبعًا لعدد الأطوار التي تشارك في عملية نقل الحرارة، ويمكن تصنيفها كما يلي:

- **المبادلات أحادية الطور:**

وهي المبادلات التي يتم فيها التبادل الحراري بين مائعين في الحالة نفسها (أي في الطور نفسه)، دون أن يحدث تغير في حالة أحد المائعين أثناء عملية التبادل الحراري.

- **المبادلات متعددة الأطوار:**

وهي المبادلات التي يحدث فيها التبادل الحراري مع تغير في حالة أحد المائعين (الطور)، مثل حالات التبخر أو التكاثف التي ترافق عملية نقل الحرارة.

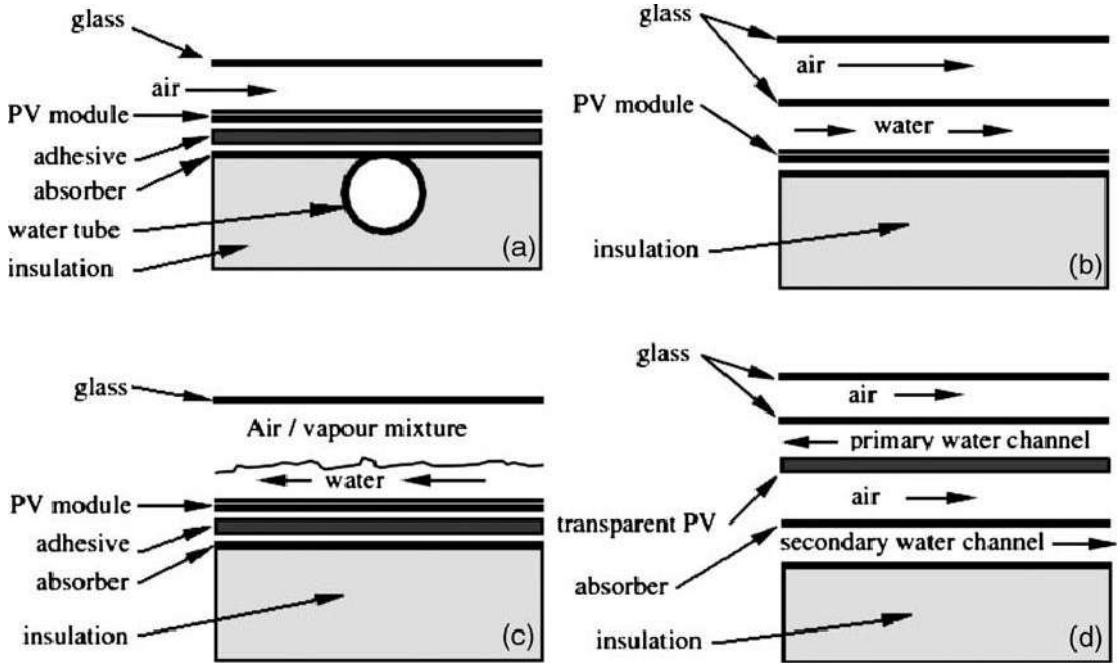
6.3 أنواع أنظمة التهجين

1.6.3 المجمعات الحرارية ذات الألواح المسطحةPV/T

قُدِّمت المفاهيم الأساسية لمجمعات الألواح الكهروضوئية المسطحة لأول مرة على يد **Kern و Russell**سنة 1978، ثم قدّم **Hendrie**نموذجًا نظريًا لأنظمة **PV/T**بالاعتماد على تقنيات المجمعات الحرارية الشمسية التقليدية. بعد ذلك قام **Florschuetz**بتوسيع نموذج **Hottel–Whillier** عروف، الذي طَوِّر لتحليل المجمعات الشمسية ذات الألواح المسطحة، ليُستخدم في دراسة وتحليل المجمعات الكهروضوئية–الحرارية الهجينة .**PV/T** [11].

ينقسم هذا النوع من المجمعات حسب نوع المائع المستخدم إلى عدة فئات، من بينها: مجمعات مائية، مجمعات هوائية، ومجمعات هجينة (ماء/هواء). وتُعد المجمعات الهوائية **PV/T**أقل كفاءة مقارنة بالمجمعات المائية **PV/T**، على الرغم من انخفاض تكاليف تصنيعها، لذلك يُستخدم هذا النوع في تطبيقات محدودة.

قام **Zondag** وآخرون بتحليل الأنواع المختلفة من المجمعات **PV/T** مثل: المجمع ذو الصحيفة والأنبوب، والمجمع ذو القناة، والمجمع ذو التدفق الحر، والمجمع ذو الماص المزدوج. وتبيّن من خلال هذه الدراسات أن أفضل كفاءة تتحقق في تصميم المجمع ذي القناة الشفافة تحت الخلايا الكهروضوئية.

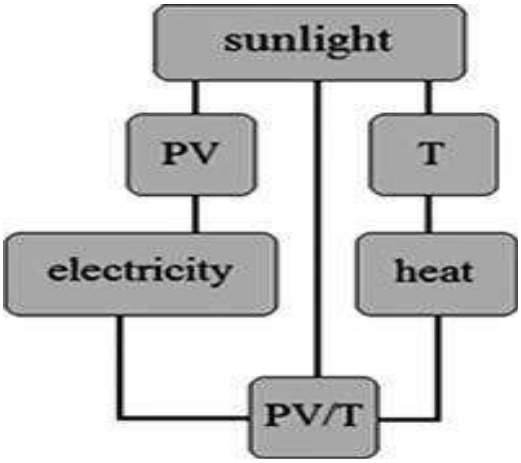


لشكل (3–2) يوضح أنواع المجمعات PV/T المختلفة: الصحيفة والأنبوب (a) والقناة (b) والتدفق الحر (c) والممتص المزدوج (d). [11]

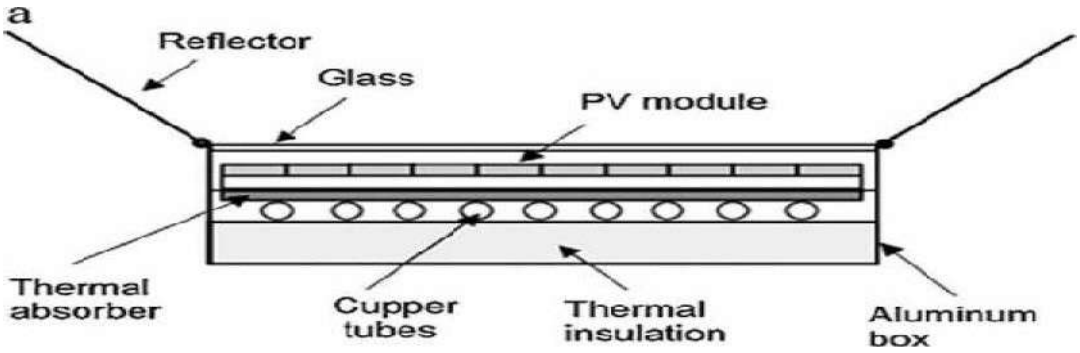
2.6.3 المجمعات المركزة PV/T

تُعد المجمعات الكهروضوئية–الحرارية المركزة (**PV/T**) من الأنظمة التي تنتج الكهرباء والحرارة في آن واحد، كما هو موضح في الشكل (3–3). ولتقليل تكلفة هذا النوع من الأنظمة، يتم تقليص مساحة الوحدات الكهروضوئية (**PV**) مع اعتماد تقنية تركيز الضوء الشمسي على سطح الخلايا باستخدام العدسات أو المرايا، وهي التقنية الأساسية في هذا النظام.

يساهم هذا التركيز في تقصير فترة استرداد تكلفة النظام، إلا أنه يؤدي في الوقت نفسه إلى ارتفاع درجة حرارة الوحدات الكهروضوئية. لذلك يجب الحفاظ على درجة حرارة منخفضة نسبيًا للخلايا أثناء التشغيل لضمان تحقيق كفاءة كهربائية عالية للنظام[8].



الشكل (3–3)مقارنة بين أنظمة PV/Tالكهرضوئية والحرارية الهجينة [11]



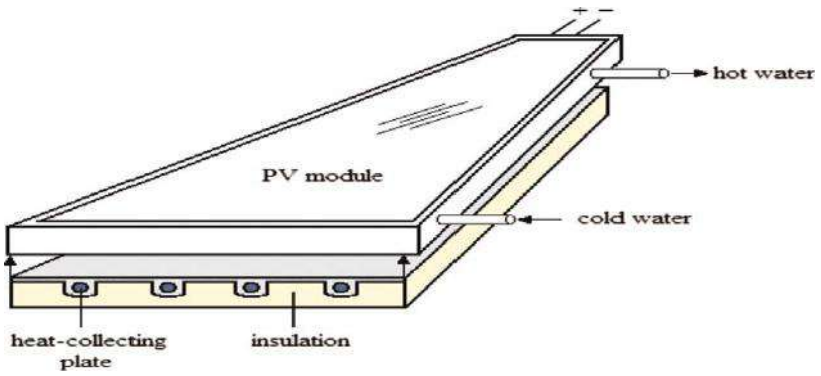
الشكل(3–4) رسم تخطيطي لمجمع تركيزيPV/T[13]

3.6.3 مجمعات المياهPV/T

تم تنفيذ أولى الدراسات حول مجمعات المياه الكهروضوئية–الحرارية (**PV/T**)على يد **Kern و Russell**في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا سنة 1978. وقد شملت هذه الدراسات خمسة تكوينات هجينة لأنظمة التدفئة والتبريد بالطاقة الشمسية، هي:نظام التسخين الشمسي الأساسي، ونظام المضخات الحرارية المتوازية، ونظام المضخات الحرارية المتسلسلة، ونظام التبريد بالامتصاص، إضافةً إلى نظام المضخة الحرارية عالية الأداء.وتم تقييم أداء هذه الأنظمة ومزاياها في أربع مناطق مناخية مختلفة بالولايات المتحدة الأمريكية هي : بوسطن، ميامي، فينيكس، وفورت وورث. [11].

تُستخدم مجمعات المياه الكهروضوئية–الحرارية (**PV/T**)في العديد من التطبيقات المنزلية والصناعية، مثل توليد الكهرباء وتسخين المياه. وغالبًا ما تُستعمل مجمعات الألواح المسطحة المتصلة على التوازي في أنظمة تسخين المياه المنزلية، حيث يعمل النظام بطريقة تلقائية عبر **السيفون الحراري**.

أما في الأنظمة الصناعية، فيُستخدم عدد من المجمعات المتصلة على التوالي لضمان تسخين المياه بدرجة كافية، وتُشغَّل عادة بواسطة مضخة تعمل بالطاقة الكهروضوئية للحفاظ على تدفق المائع داخل المجمع[13].



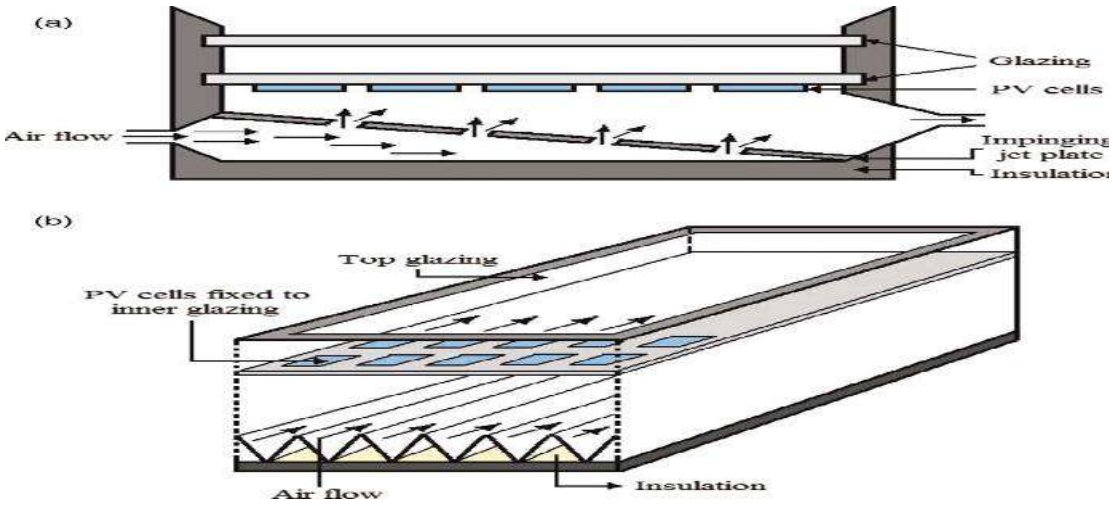
الشكل (3–5) رسم تخطيطي يوضح مجمع مياه هجين (PV/T)[11]

4.6.3 مجمعات الهواءPV/T

تم تنفيذ أول تجربة لمجمعات الهواء الكهروضوئية–الحرارية (**PV/T**)في مشروع **Solar One** **House**بجامعة ديلاوير على يد **Boerr**و.**Tamm**.كما أجرى **Florschuetz**دراسات نظرية وتجريبية على مجمعات **PV/T**التي تستخدم الهواء أو الماء كسائل تبريد، وبيّن أن هذه الأنظمة قادرة على إنتاج الكهرباء وتسخين الهواء في وقت واحد. ويُستخدم الهواء الساخن الناتج عادة لأغراض التدفئة أو التجفيف.

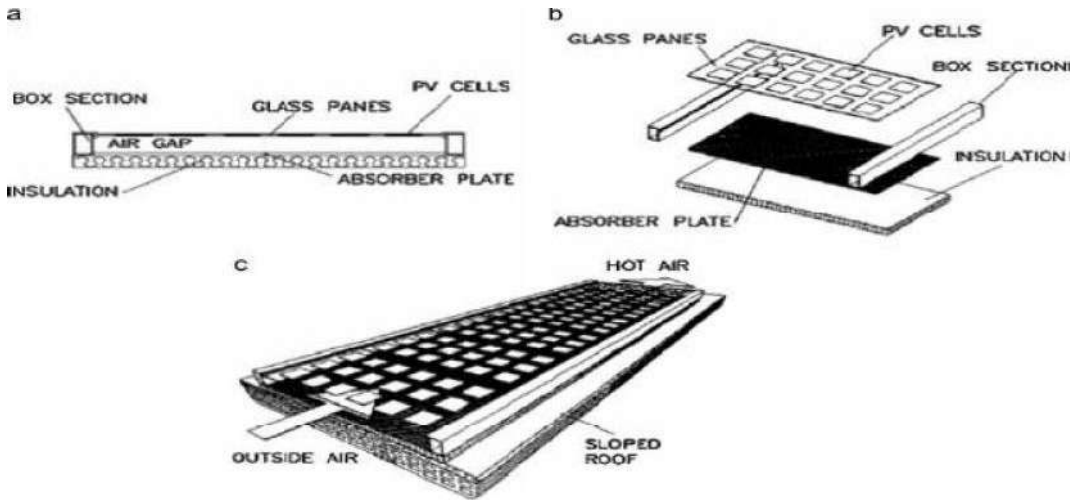
تمت دراسة عدة تصاميم لمجاري الهواء من قبل باحثين سابقين، مثل سخانات الهواء الشمسية المزوّدة بخلايا كهروضوئية، حيث فُحصت أنظمة **PV/T–air**ذات الممر الفردي والمزدوج، سواء كانت مزججة أو غير مزججة، لأغراض تدفئة المساحات وتجفيف المواد. أظهرت الدراسات أن كفاءة مجمعات المياه **PV/T**أعلى من كفاءة مجمعات الهواء **PV/T**، ويُعزى ذلك إلى الخصائص الفيزيائية والحرارية المتفوقة للماء مقارنة بالهواء.

اقترح **Hendrie**تصميمين لمجمعات الهواء الهجينة **PV/T**كما هو موضح في الشكل (3-6)



الشكل (3-6) يوضح مجمع الهواء **PV/T** الهجين مع(**a**)تصميم نفاث مؤثرو(**b**)تصميم مموج على شكل حرف **V**[11]

- في التصميم الأول (**a**)، يتدفق الهواء عبر ثقوب بقطر 0.25 سم في الماص الثانوي ويصطدم بالماص الأساسي. وقد حُددت الكفاءات الحرارية والكهربائية لهذا النظام بـ **42%** و **8.9%** على التوالي.
- أما التصميم الثاني (**b**)فيتكون من ماص ثانوي مموج على شكل حرف **V**، حيث تلامس أطراف الحرف **V** الماص الأساسي، وقد بلغت الكفاءات الحرارية والكهربائية له **40%** و **7.8%** على التوالي[11]



الشكل (3-7) رسم تخطيطي لمجمع الهواء حيث (a) **عرض المقطع العرضي** (b) **عرض الانفجار**(c) **عرض التصفيف[13]**

ونذكر بعض المجمعات PV/T المحسنة منها:المجمع الهوائي الهجين ,المجمع الشمسي PV/T مزدوج التمرير [2]

5.6.3 نظام تسخين المياه ذو اللوح المسطح الحراريN-PVT-FPC

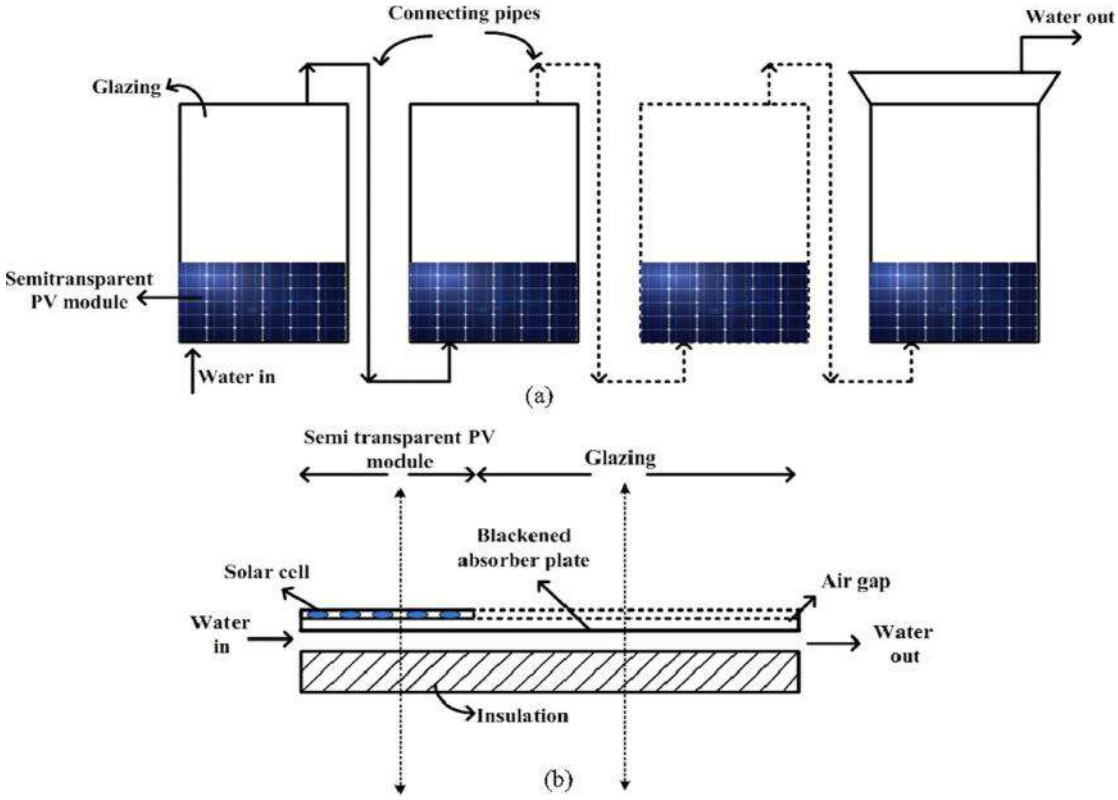
الطاقة الشمسية من الطاقات النظيفة والمتجددة في العالم، ولذلك استُخدمت على نطاق واسع لتسخين المياه، وأصبحت سخانات المياه الشمسية من الأجهزة الشائعة التي تسخّر الطاقة الشمسية، إذ باتت بديلاً فعالًا للسخانات الكهربائية التقليدية.ويُعتبر نظام تسخين المياه بالطاقة الشمسية (**SWH**) بديلًا عمليًا عن الكهرباء والوقود الأحفوري، أي عن مصادر الطاقة التقليدية. ويتكوّن النظام الشمسي الحالي من أنبوب زجاجي أسطواني يعمل كمستقبل للطاقة الشمسية، وخزان لتخزين المياه، وملف نحاسي (قناة سائلة) يُوضع داخل الأنبوب الزجاجي ويعمل كمجمّع حراري.يُسخَّن مائع العمل أثناء مروره مباشرة داخل الأنبوب، كما يمكن استخدام سوائل أخرى لنقل الحرارة من خلال دمج المبادل الحراري في النظام.

تُقسَّم أنظمة التسخين هذه إلى نوعين: أنظمة **سلبية** وأنظمة **نشطة**، حيث يمكن استخدام عدة أوضاع لتدوير المائع. ويُعد اقتران المجمّع الشمسي (**FPC**)بأفضل التقنيات المستخدمة في هذا المجال، حيث تتصل مجمعات المياه الحرارية الكهروضوئية **N-PVT-FPC**على التوالي لتكوين نظام متكامل عالي الكفاءة.

يُظهر الشكل (3-8 (a) (المنظر الأمامي، و (b)المنظر الجانبي لمجمعات **N-PVT-FPC**الحرارية الكهروضوئية المغطاة جزئيًا والمتصلة على التسلسل. الشكل (3-8).

ينقل السطح الخلفي للخلايا الشمسية في الوحدة الكهروضوئية الحرارة الناتجة عبر آلية الحمل الحراري، إضافة إلى الامتصاص المباشر للإشعاع الشمسي عبر المنطقة غير المغطاة من وحدة **SPV**والزجاج، بواسطة لوحة امتصاص

سوداء. تقوم لوحة الامتصاص بدورها بنقل الطاقة الحرارية إلى الماء المتدفق داخل الأنابيب النحاسية، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارته. [10]

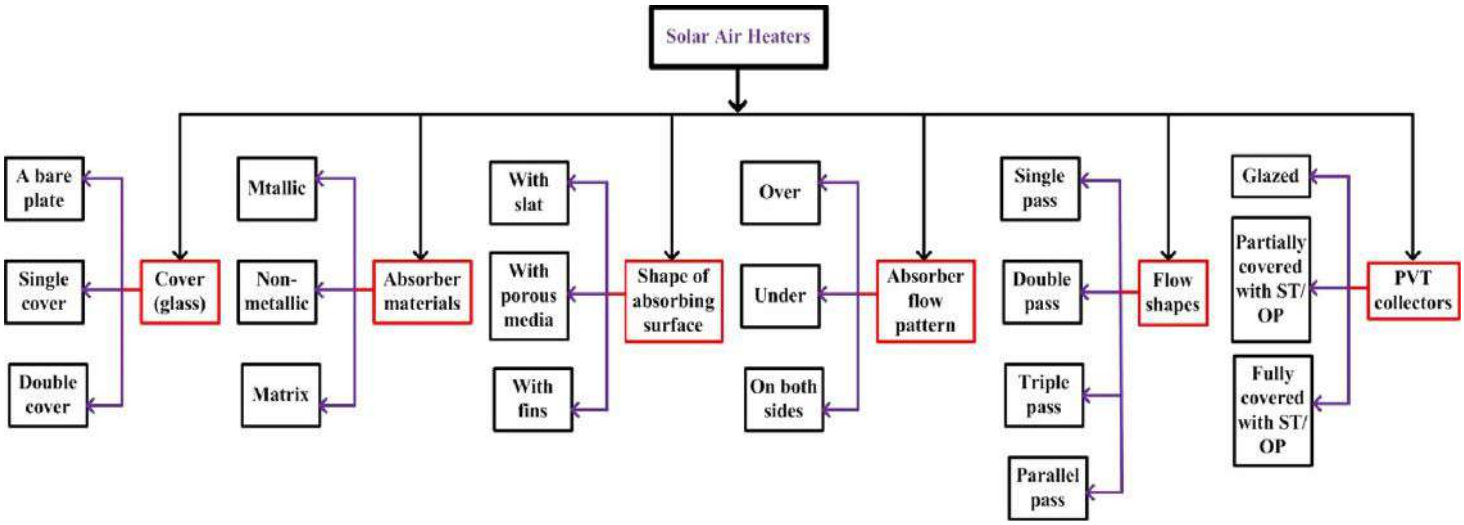


الشكل (3–8)(a)المنظر الأمامي (b)المنظر الجانبي لمجمعات Nالحرارية الكهروضوئية المغطاة جزئيا(جزء Iower)(PVT)المتصلة على التسلسل.[10]

6.6.3 نظام تسخين الهواء ذو اللوح المسطح الحراريN–PVT–FPC

استخدام الهواء كوسيط عمل من الحلول المميزة مقارنة بالمجمعات الشمسية الأخرى التي تعتمد على السوائل مثل الماء، إذ يتميز بعدة مزايا، منها مقاومة التآكل، وانخفاض احتمالية التسرب عبر الوصلات والقنوات،

وعدم الحاجة إلى أنظمة حماية من الضغط العالي، إضافة إلى إمكانية التشغيل في ظروف التجمد، فضلاً عن كون النظام أكثر إحكامًا وخفة في الوزن.غير أن العيب الرئيس لهذا النوع من المجمعات يكمن في انخفاض معدل انتقال الحرارة نتيجة الموصلية الحرارية المحدودة للهواء، إضافةً إلى السعة الحرارية المنخفضة له، مما يتطلب حجمًا أكبر من الهواء لكل وحدة مساحة من المجمع لتخزين كمية الطاقة الحرارية المطلوبة.



الشكل (3-9) يُوضح تصنيف سخانات الهواء الشمسية المختلفة ومكوناتها.

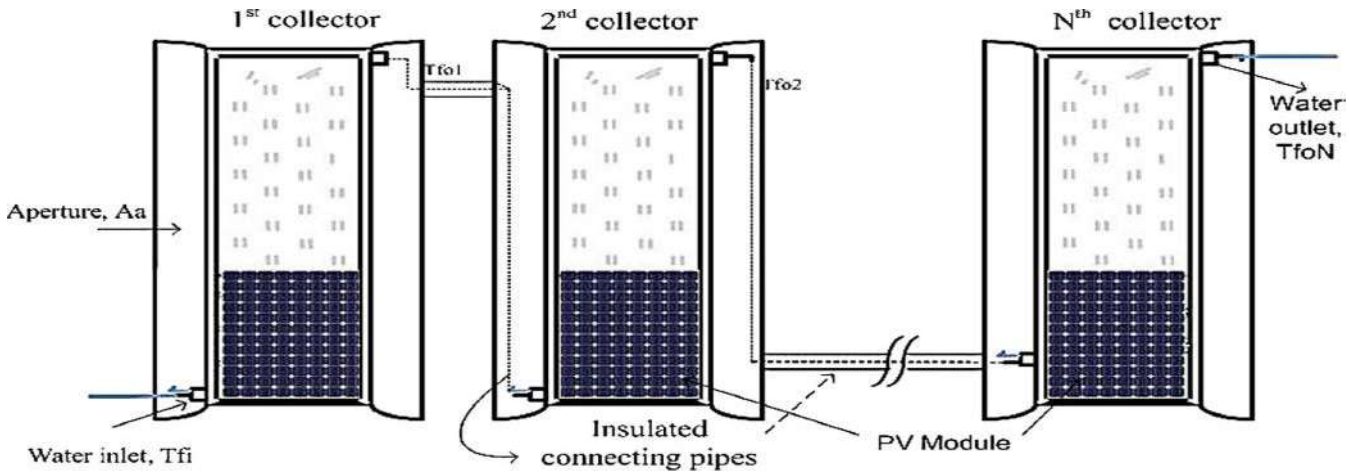
من الناحية العملية، يُعد الأداء الحراري وفعالية التكلفة من أهم الجوانب التي تؤخذ في الاعتبار في التصميم التجاري لهذه السخانات. وتُشير معظم الدراسات إلى أن معدل انتقال الحرارة بين سطح الامتصاص والهواء المتدفق يُعتبر العامل الأساسي في تحسين أدائها ورفع كفاءتها[2].

7.6.3 المركب المكافئ(N-PVT-CPC) PV/T

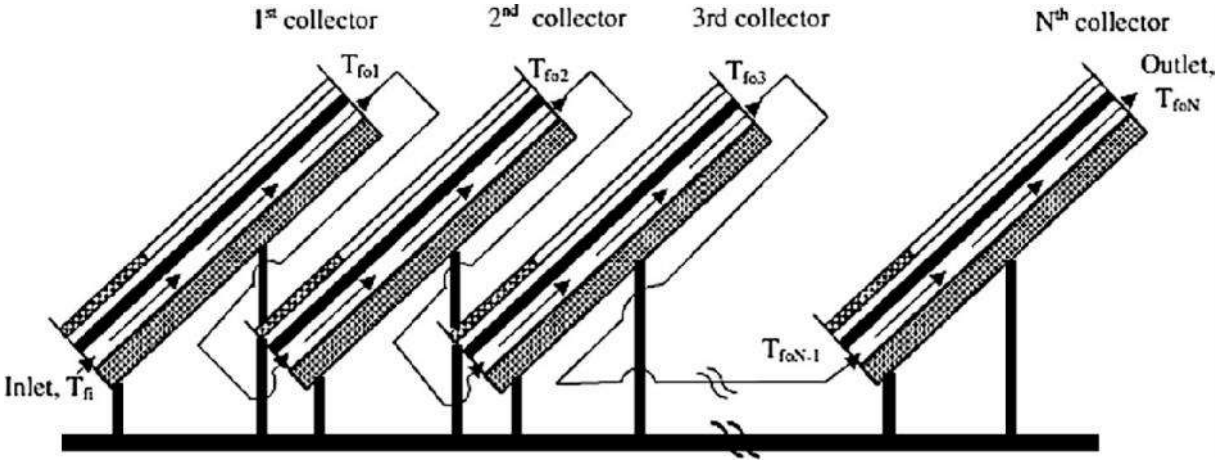
المكثف المكافئ المركب (**Compound Parabolic Concentrator – CPC**)من الأنظمة غير المصورة ذات زاوية قبول كبيرة، ويتطلب تتبعًا جزئيًا لحركة الشمس. يتكوّن هذا النظام من جزأين مكافئين موجهين بطريقة يُوضَع

فيها تركيز أحدهما عند النقطة النهائية السفلية للآخر، والعكس صحيح. وتُعد كل من **منطقة الفتحة، وزاوية القبول، ومنطقة الامتصاص، ونسبة التركيز الهندسية، وعامل التقاطع، والكفاءة الضوئية** من العوامل الأساسية التي تحدد أداء هذا النوع من الأنظمة وتؤثر في تكلفته [6].

أظهرت الدراسات والتجارب المتعددة أن أداء نظام **PVT–CPC** أفضل بكثير من أداء الأنظمة الكهروضوئية المسطحة **PV** والأنظمة الهجينة المسطحة **PVT**. وقد تم اشتقاق معادلات تصف كفاءة الخلايا الشمسية ودرجة حرارة الماء الخارج من المجمع الحراري **N–PVT–CPC**، مع تحليل أداء سلسلة من المجمعات المتصلة جزئيًا والمغطاة، استنادًا إلى العوامل المناخية والتصميمية. وتبيّن من النتائج أن أعلى كفاءة للنظام تتحقق في فصل الشتاء، نتيجة انخفاض الفواقد الحرارية وتحسن ظروف التبادل الحراري.



الشكل (3–10)(a)المركزات المكافئة للمركب الحراري N-PVT-CPC متصلة على التسلسل[10]



الشكل (3–10)(b)مظهر جانبي للمركزات المكافئة للمركب الحراري N-PVT-CPCمتصلة على التسلسل[10]

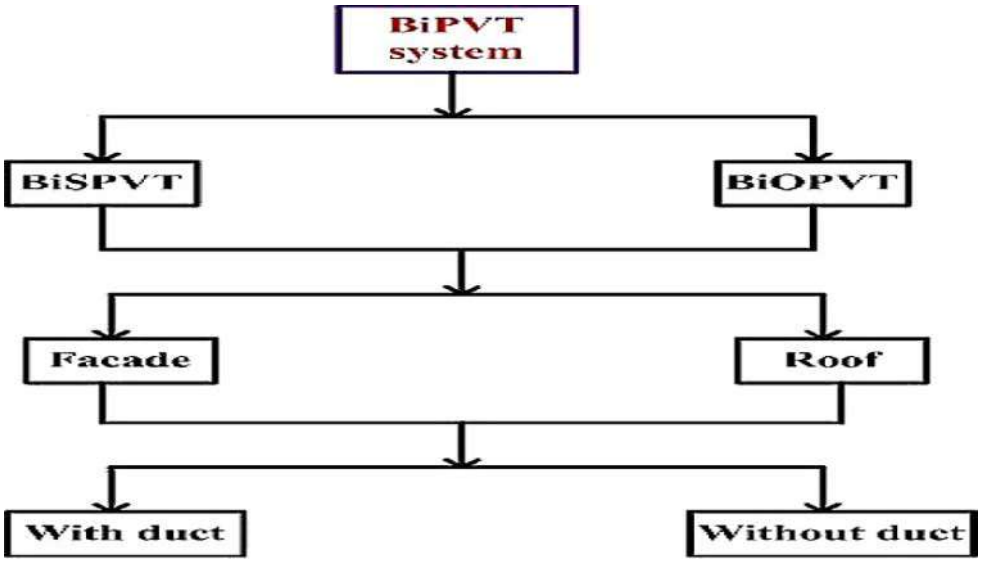
8.6.3 النظام الحراري الضوئي المتكامل(BiPVT)

يُعرف النظام الحراري الكهروضوئي المدمج مع غلاف المبنى – سواء في الأسطح أو الواجهات – باسم **النظام الحراري الضوئي المتكامل** .(**BiPVT**) وتتميز هذه الأنظمة بقدرتها على إنتاج الطاقة الحرارية والكهربائية في الوقت نفسه.فعلى المستوى المنزلي أو في المنشآت الصغيرة، يمكن لنظام **BiPVT**تلبية كامل الاحتياجات من الطاقة الحرارية والكهربائية، بينما تُستخدم الأنظمة الواسعة النطاق في المنشآت الصناعية أو المراكز المجتمعية لتغذية الشبكات الكهربائية بالطاقة.وكان التعاون بين المهندسين المدنيين والمعماريين ومصممي أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV) أساسًا رئيسيًا في تصميم أنظمة **BiPVT**، إذ تشكل الأسطح والواجهات العناصر الأساسية لتركيب هذه الأنظمة.و اتجاه الشمس أحد العوامل المحددة لكفاءة النظام، نظرًا لتغيّر زاوية الإشعاع على مدار اليوم والفصول، مما يستدعي تحسين التصميم ليتلاءم مع الموقع والظروف المناخية.

تسهم هذه التقنية في تقليل تكلفة المواد التقليدية لبناء واجهات المباني أو الأسطح، حيث يمكن دمجها كجزء من هيكل المبنى نفسه. وتتوفر تجاريًا ثلاث تقنيات رئيسية للأغشية الرقيقة المستخدمة في أنظمة **BiPV**، وهي:

- السيليكون غير المتبلور(**a–Si**) ،
- الكادميوم تيلورايد(**CdTe**) ،
- نحاس الإنديوم الغاليوم سيلينيد.(**CIGS**)

يُظهر الشكل (3–11) تصنيف أنظمة **BiPVT** المختلفة.



الشكل (3–11) يوضح تصنيف أنظمة BiPVT **[10]**

ويمكن للأنظمة شبه الشفافة منها أن توفّر إضاءة طبيعية للمباني (عبر الأسقف أو الجدران أو النوافذ) إضافة إلى إنتاج الكهرباء والحرارة في الوقت ذاته، مما يجعل التصميم الملائم عاملًا حاسمًا لتحقيق الاستفادة المثلى من الإضاءة والطاقة داخل المساحات السكنية.

7.3 تصنيف المبادل الحراري وفقًا لتصميمها

يُصنَّف تصميم المبادلات الحرارية إلى أربعة أنواع رئيسية كما يلي:

- **1.7.3المبادلات ذات الرأس الثابت:**

يتميز هذا النوع بوجود فرق كبير في درجات الحرارة بين المائعين، إذ تكون نهايتا حزمة الأنابيب مثبتتين بشكل ثابت، مما يجعلها غير مناسبة لتحمل التمدد الحراري الكبير. ويُستخدم هذا النوع عادةً مع الموائع ذات الضغوط المنخفضة ودرجات الحرارة التي لا تتجاوز **150°م**[9].

- **2.7.3 المبادلات الحرارية ذات الرأس العائم:**

في هذا النوع تُثبت إحدى صفيحتي الأنابيب من طرف، بينما تُترك الصفيحة الأخرى حرة الحركة لتسمح بتمدد حزمة الأنابيب نتيجة الفروق الحرارية الكبيرة بين المائعين. ويُستخدم هذا النوع على نطاق واسع في الصناعات النفطية، ويمتاز بسهولة تنظيفه وصيانته[9].

- **3.7.3 المبادلات الحرارية ذات الأنابيب على شكل حرف:U**

تتكوّن هذه المبادلات من حزمة أنابيب مثنية على شكل حرف **U**ومثبتة على صفيحة واحدة للأنابيب، مما يسمح بتمددها بحرية تامة. ويُعد هذا النوع مناسبًا لدرجات الحرارة والضغوط العالية، ويُستخدم عادة في الغلايات لتسخين البخار، غير أن تنظيفه بالوسائل التقليدية يُعد أكثر صعوبة مقارنة بالأنواع الأخرى[9].

- **4.7.3 المبادلات الحرارية ذات الأنبوب المزدوج:**

يتكوّن هذا النوع من أنبوب خارجي يحتوي داخله أنبوبًا آخر أقصر منه، بحيث يمر أحد الموائع داخل الأنبوب الداخلي، بينما يمر المائع الآخر داخل الأنبوب الخارجي لإتمام عملية التسخين أو التبريد حسب الحاجة. [9].

8.3 معادلات المبادلات بالنسبة للمجمعات الحرارية المسطحة

تُستخدم المياه كسائل تبريد رئيسي في المجمعات الحرارية ذات الألواح المسطحة، حيث يجري تدويرها بين الخلية الكهروضوئية والزجاج لتُستعمل بعد ذلك في الأغراض المنزلية.

يُعبَّر عن كمية الحرارة الممتصة في هذه المجمعات بالعلاقة التالية:

T_{fo}: درجة حرارة الماء عند المخرج.

T_{fi}: درجة حرارة الماء عند المدخل.

C_p: السعة الحرارية $(J/Kg\ K)$.

$\dot{m}$: التدفق الكتلي(Kg/s).

Q_u : كمية الحرارة بالجول .

في الحالة المستقرة، يمكن حساب الكفاءة الحرارية للمجمعات الحرارية ذات الألواح المسطحة بالعلاقة:

لدينا G هو مستوى شدة الإضاءة.

نستطيع كتابة المعادلة الأولى بالنسبة لدرجة حرارة اللوح الماص على الشكل التالي:

Q_u

$\mathbf{A_c}$: منطقة مجمع للخلايا الكهروضوئية PV/T.

S : الطاقة الشمسية .

U : معامل فقد الحرارة الإجمالي .

$\mathbf{T_{ap}}$: درجة حرارة لوح الامتصاص.

$\mathbf{T_{amb}}$: درجة حرارة المحيط .

الشكل (**3-12**) رسم يوضح مختلف التكوينات لمجمع هجين من **PV/T** [11]

نقوم بتبسيط المعادلة(3 – 3) وذلك لأننا نجد صعوبات في الحساب وتصبح كالتالي :

$$\mathbf{Q_u = A_c F_r [S - U(T_{fi} - T_{amt})} \qquad \mathbf{(4 - III)}$$

$\boldsymbol{F_r}$: عامل إزالة الحرارة لمجمع PV/T.

ويحسب بالمعادلة التالية:

F_r =

F وهو معامل الشكل ويدل في هذه المعادلة على عامل كفاءة المجمع المعطى بالعلاقة التالية:

$$F_e = \frac{1/U}{W\left[\frac{1}{U\left[D_o+(W-D_o)F_{fe}\right]}+\frac{1}{C_b}+1/\pi D_i h_{fi}\right]} \qquad (6-3)$$

W: تباعد الأنبوب .

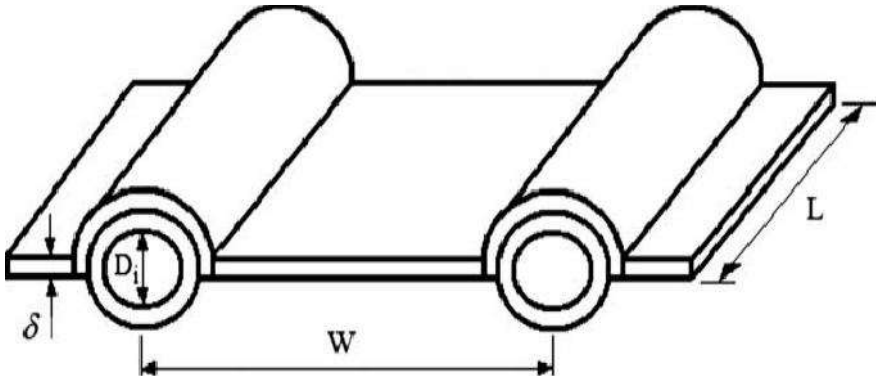
D_i : قطر الأنبوب الداخلي.

D_o: قطر الأنبوب الخارجي .

C_b: التوصيل الحراري للرابطة بين الزعنفة والأنبوب.

h_{fi}:معامل نقل الحرارة للسائل.

F_{fe}:عامل كفاءة الزعنفة.



الشكل(**3-13**) يوضح أبعاد مجمع حراري تقليدي.[11]

يتم حساب هذا الأخير على النحو التالي :

حيث يمثل x سماكة الزعنفة كما هو موضح في الشكل (3-12).

* معادلة التوازن الحراري بالنسبة للوح الشمسي:

$$m_{pv}\,Cp_{pv}\frac{T_{pv}^{\,t}-T_{pv}^{\,t-\Delta t}}{\Delta t} = -h_{conv(pv\to a)}\,S_{pv}(T_{pv}-T_a) - h_{rad(pv\to ci)}S_{pv}(T_{pv}-T_{ci}) - h_{cond(pv\to r)}S_{pv}(T_{pv}-T_r) + IS_{pv}\alpha_{pv} \qquad (9-3)$$

* معادلة التوازن الحراري بالنسبة للأنبوب الماص:

$$mCp_r\frac{T_r^{\,t}-T_r^{\,t-\Delta t}}{\Delta t} = -h_{cond(r\to pv)}S_r(T_r-T_{pv}) - h_{conv(r\to f)}S_r(T_r-T_f) - h_{cond(r\to i)}S_r(T_r-T_i) \qquad (10-3)$$

* معادلة التوازن الحراري بالنسبة للمائع:

$$\dot{m}_f Cp_f\left(T_f^{\,t}-T_f^{\,t-\Delta t}\right) = -h_{conv(f\to r)}S_r(T_f-T_r) \qquad (11-3)$$

* معادلة التوازن الحراري بالنسبة للعازل:

$$\mathbf{m}_i \, Cp_i \frac{\mathbf{T}_i^{\mathbf{t}} - \mathbf{T}_i^{\mathbf{t}-\Delta \mathbf{t}}}{\Delta \mathbf{t}} = -\mathbf{h}_{cond(i-r)} \mathbf{S}_i (\mathbf{T}_i - \mathbf{T}_r) - \mathbf{h}_{conv(i-a)} \mathbf{S}_i \left(\mathbf{T}_i - \mathbf{T}_a \right) \qquad (12-3)$$

9.3 كفاءة نظام التهجين

تعمل الخلايا الشمسية على تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية، إلا أن جزءاً كبيراً من هذه الطاقة يتحول إلى حرارة، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الخلية الكهروضوئية (**PV**)وبالتالي انخفاض كفاءتها الكهربائية. ومن الواضح أن تقليل درجة حرارة الوحدة الكهروضوئية يؤدي إلى تحسين كفاءتها الكهربائية، ويمكن تحقيق ذلك عبر إزالة الطاقة الحرارية الزائدة المتولدة في الخلية من خلال تدفق مائع التبريد (هواء أو ماء) أسفل الوحدة الكهروضوئية[2].

لوحظ أن الكفاءة الحرارية تنخفض بشكل ملحوظ عند وجود فرق كبير في درجة الحرارة بين الخلايا الكهروضوئية واللوح الماص.

تُحسب الكفاءات الحرارية والكهربائية لمجمع **PV/T** من خلال العلاقات التالية[12]:

حيث :

$\dot{\mathbf{m}}$: التدفق الكتلي للمبرد

C: السعة الحرارية النوعية للمبرد

A: منطقة فتحة المجمع

$\mathbf{T_{in}}$ و$\mathbf{T_{out}}$:درجات حرارة المخرج والمخرج للمبرد.

G:الإشعاع الشمسي الساقط طبيعي على السطح.

$\mathbf{V_{mpp}}$: الجهد الكهربائي عند تشغيل نقطة الطاقة القصوى.

$\mathbf{I_{mpp}}$: التيار الكهربائي عند تشغيل نقطة الطاقة القصوى.

أظهرت الدراسات أن الكفاءة الحرارية والكهربائية الكلية تكون أعلى عندما تُوضَع الوحدة الكهروضوئية في الجزء السفلي من النظام الحراري مقارنة بوجودها في الأعلى. ويعود ذلك إلى أن الماء يُسخَّن مسبقًا عند مروره عبر اللوح الماص الزجاجي في حالة الموضع العلوي، مما يقلل انتقال الحرارة من الخلية الكهروضوئية إلى المائع ويرفع درجة حرارة الخلية، وبالتالي يُضعف الأداء الكهربي للنظام[2].

10.3 تطبيقات التهجين

شهدت أنظمة **PV/T** تطورًا وانتشارًا واسعًا في مختلف أنحاء العالم، وأصبحت تُستخدم في العديد من المجالات والتطبيقات العملية. ومن أبرز هذه التطبيقات **أنظمةC–PVT** ، وهي من أكثر التقنيات شيوعًا في مجال تكييف الهواء باستخدام آلات الامتصاص. كما تُستخدم هذه الأنظمة في عمليات **التقطير الشمسي للمياه قليلة الملوحة** للحصول على مياه عذبة، ما يجعلها مناسبة لتطبيقات الريف والمناطق النائية.

تم في الهند اختبار تصميم مقترح لنظام **PVT** مستدام ومتكامل للطاقة الشمسية النشطة، إضافة إلى تطبيقات أخرى مثل **تجفيف المحاصيل الزراعية**، حيث يعتمد النظام على إزالة الرطوبة الزائدة من المنتجات الزراعية عبر التبخر الناتج إما عن **الحمل الحراري الطبيعي** أو **الحمل القسري**.

وقد تم تطوير مجفف هجين يعمل بالوضع المختلط، بينما استُخدم الوضع القسري في التطبيقات الحضرية داخل المدن الهندية.

يمكن تقييم أداء المنتجات التجارية لأنظمة **PVT** سواء في **الهواء الطلق** أو **المنشآت الداخلية** .

ويُجرى الاختبار الخارجي عادة في ظروف مناخية مستقرة وجيدة، غير أنه لا توجد حتى الآن معايير دولية معتمدة لاختبار هذه المجمعات في المنشآت الداخلية. لذا فإن توفير **طريقة اختبار موحدة ومعترف بها دوليًا** يُعد خطوة أساسية لتطوير وتسويق منتجات **PVT** وجعلها قادرة على المنافسة مع الأنظمة الشمسية الحرارية التقليدية.

من الناحية الاقتصادية، يُلاحظ أن سوق الطاقة الشمسية الحرارية والخلايا الكهروضوئية يشهد نموًا متسارعًا، وأن أنظمة **PVT** تمتلك القدرة على النمو بالمعدل نفسه، بل وتتفوق في بعض التطبيقات. وتكمن أكبر الإمكانات السوقية لأنظمة **PVT** في **القطاع المنزلي**، الذي يُمثل نحو **90%من السوق الحالية**.

وعلى المدى القصير، يمكن أن تكون المنازل الفردية العميل الرئيس لهذه الأنظمة لتوفير المياه الساخنة المنزلية، على أن يمتد استخدامها مستقبلًا إلى المباني متعددة الأسر، حيث يكون الطلب على الماء الساخن أكثر استقرارًا وانتظامً [12]ا.

11.3 مقارنة أداء السوائل والهواء

أظهرت الدراسات أن أداء المجمعات التي تستخدم السوائل أفضل من أداء المجمعات التي تعتمد على الهواء كسائل تبريد، وذلك نظرًا للخصائص الحرارية والفيزيائية المميزة للسوائل، مثل سعتها الحرارية العالية وقدرتها على نقل الحرارة بكفاءة أكبر. كما تبيّن أن **معدل تدفق المائع** يلعب دورًا مهمًا في تحسين أداء مجمعات الهواء، إذ يؤدي زيادة التدفق إلى تعزيز عملية انتقال الحرارة وبالتالي رفع الكفاءة الحرارية للنظام.

ومن جهة أخرى، يُلاحظ أن الفارق في الأداء بين مجمعات السوائل ومجمعات الهواء يقلّ تدريجيًا عند ارتفاع **شدة الإشعاع الشمسي**، حيث تعمل جميع الأنظمة بكفاءة أعلى في ظروف الإشعاع القوي[2].

خاتمة

يظهر هذا الفصل أن تقنية **التهجين الكهروضوئي – تركيز شمسي – حراري** تمثل نقلة نوعية في مجال استغلال الطاقة الشمسية، إذ تُمكّن من توليد الكهرباء والحرارة في نظام واحد، مما يجعلها حلاً واعدًا لزيادة كفاءة استخدام الطاقة الشمسية والحد من الفاقد منها.

تم في هذا الفصل عرض المبادئ الأساسية لمختلف مكونات أنظمة التهجين وطرق عملها، بدءًا من تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية بواسطة الألواح الشمسية، مرورًا بتقنية تركيز الأشعة الشمسية لإنتاج حرارة عالية، وصولًا إلى التهجين الحراري الذي يستغل هذه الحرارة في رفع كفاءة الخلايا الكهروضوئية وتوفير تطبيقات حرارية متنوعة.

تبيّن أن التحدي الرئيس في تحقيق كفاءة مرتفعة لهذه الأنظمة يتمثل في **تبريد الخلايا الكهروضوئية**، إذ يؤدي ارتفاع درجة حرارتها الناتج عن تركيز الإشعاع إلى انخفاض مردودها الكهربائي. ومن هنا تبرز أهمية

المبادلات الحرارية كعنصر أساسي في أنظمة التهجين، لما لها من دور في سحب الحرارة الزائدة من الخلايا الشمسية والحفاظ على درجة حرارتها ضمن نطاق التشغيل المثالي، مع إمكانية استغلال هذه الحرارة في تطبيقات أخرى.

كما تم تعريف المبادلات الحرارية وشرح مبدأ عملها ضمن سياق أنظمة التهجين، وبيان تأثير **تدفق المائع المبرد** على كفاءة تبريد الخلايا الشمسية. وتم كذلك استعراض أنواع مختلفة من أنظمة التهجين، مثل المجمعات الحرارية ذات الألواح المسطحة والمركزة والمائية والهوائية، مع تحليل العوامل المؤثرة في أدائها وكفاءتها.

إضافة إلى ذلك، تناول الفصل تصنيف المبادلات الحرارية حسب تصميمها ووظائفها، وبيّن مدى ملاءمتها لظروف التشغيل المختلفة. كما تطرق إلى **المعادلات الأساسية** التي تحكم أداء المجمعات الحرارية وكفاءة أنظمة التهجين، مسلطًا الضوء على أهمية العوامل الفيزيائية مثل **التدفق الكتلي للمائع المبرد** و**السعة الحرارية النوعية** في تحسين الأداء العام.

وأخيراً، تم الإشارة إلى **التطبيقات الواعدة** لأنظمة التهجين في مجالات متنوعة، مثل تسخين المياه، والتبريد، والتجفيف، والتقطير الشمسي، مما يجعلها من بين الحلول المستقبلية المهمة لتحقيق الاستدامة الطاقوية وتطوير استخدامات الطاقة الشمسية في مختلف القطاعات.

المراجع

[1]كاميليا يوسف محمد، *تكنولوجيا محطات المركزات الشمسية*، دار المريخ للنشر، المملكة العربية السعودية، 2013.

[2] N. S. Alghoul, M. S. J. Hashim, *et al.*, "Effect of temperature on photovoltaic solar cell performance: A review," *Solar Energy*, vol. 85, no. 5, pp. 1025–1034, 2011.

[3] محمد أحمد السيد خليل، *الطاقة الشمسية واستخداماتها*، دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع، القاهرة، 2009 .

[4]فراح هاجر، مهوبي خولة، *المركزات الشمسية وأنظمة تخزين الطاقة الحرارية*، جامعة قاصدي مرباح – ورقلة، 2018.

[5]كاميليا يوسف محمد، *الطاقة الكهروشمسية*، دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع، الإسكندرية، 2016.

[6]شبوعات أحلام، فارسي إيمان، *الحساب النظري والعملي لزوايا الميل المثلى للمرايا المسطحة في المركزات الشمسية الكهروضوئية بمنطقة ورقلة*، مذكرة ماستر أكاديمي، تخصص فيزياء طاقوية، جامعة قاصدي مرباح – ورقلة، 2019.

[7]مسعود يوسف عياش، *تكنولوجيا الطاقة البديلة*، سلسلة عالم المعرفة، الكويت، 1981.

[8]عيادي عائشة، *دراسة المركز الشمسي لضخ الإشعاع الشمسي لغرض التطبيقات الإلكترونية الضوئية*، جامعة قاصدي مرباح – ورقلة، 2023.

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

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

[11] J. Leo, *Modélisation et conduite optimale d'un cycle combiné hybride avec source solaire et stockage*, Université Grenoble Alpes, 2015.

[12] R. R. Stowell, *Photovoltaic Systems Engineering*, CRC Press (Taylor & Francis Group), USA, 2004.

[13] A. Zahid *et al.*, "Design and performance of a concentrated photovoltaic/thermal (CPV/T) system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 119, p. 109551, 2020.

الفصل الرابع:النمذجة الرياضية للنظام المدروس

المقدمة

لتصميم نموذج دراسة متكامل لنظام هجين كهروضوئي–حراري بالمركز الشمسي(PVCT) ، نعود بالتفصيل إلى هندسة مركز الأشعة ذي القطع المكافئ الأسطواني(PTC) ، وذلك من خلال تحديد الأبعاد الأساسية والمعادلات الرياضية التي تصف هيكل النموذج، وحساب كلٍّ من البعد المحرقي وزاوية الحافة.

بعد ذلك نتطرق إلى الدراسة الضوئية للـ(PTC) ، من حيث حساب الإشعاع الشمسي المباشر والمنتشر الذي يصل إلى الموقع الجغرافي للنموذج.

ثم نعرض النمذجة الرياضية للخلية الشمسية الكهروضوئية مع تقديم الدارة المكافئة ومعادلات أدائها الكهربائي.

وبناءً على ذلك، نصل إلى نمذجة النظام الهجين (PVCT) للنموذج المقترح وفق أبعاده وخصائص مكوناته والظروف المناخية لمنطقة الدراسة (ورقلة، الجزائر.(

وباستخدام الفرضيات التبسيطية المعتمدة في عملية المحاكاة، نحصل على المعادلات الأساسية التي تحكم الدراسة الحرارية للنظام الهجين، مع التركيز على موازنة الطاقة الحرارية لمختلف أجزاء النظام.

4.1 مركز الأشعة ذي القطع المكافئ الأسطواني(PTC)

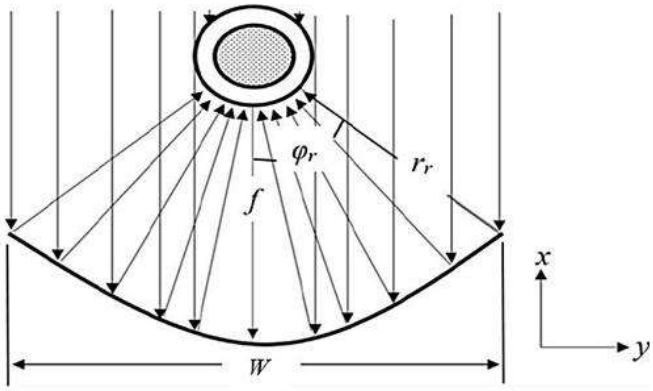
يتكوَّن مركز الأشعة (PTC) من عاكسٍ أسطوانيٍّ على شكل قطعٍ مكافئ، وتُعطى معادلة مقطعه العرضي بالعلاقة:

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

حيث f : البعد المحرقي

ومن أجل أبعاد الـ PTC التالية :

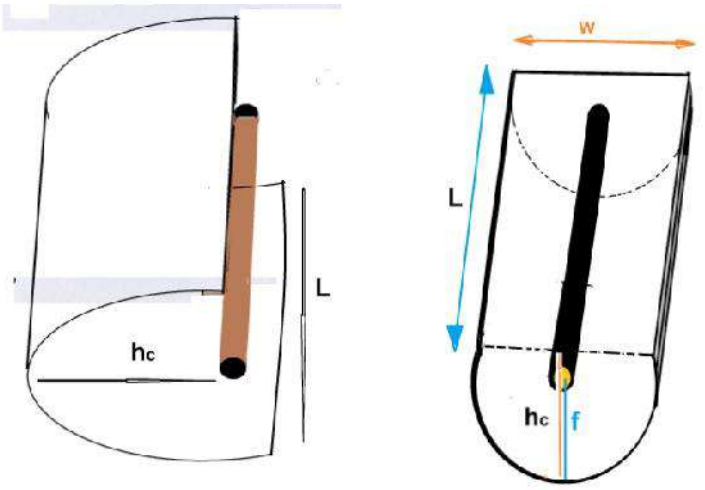
- L: الطول
- w : عرض الفتحة
- hc : ارتفاع حافة العاكس.



الشكل (4 -1) أبعاد PTC

فان البعد ألمحرقي f يعطى بالعلاقة :[1] [2]

$$f = \frac{w^2}{16.h_c} \qquad (2-4)$$

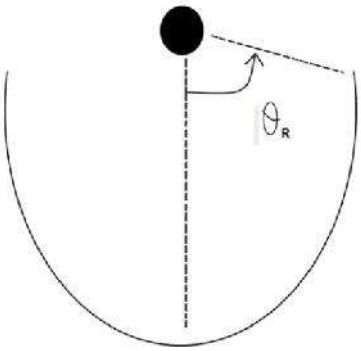


الشكل (4 -2) أبعاد PTC

زاوية الحافة θ_R

زاوية الحافة هي الزاوية المحصورة بين المحور الشاقولي (OZ) والخط الواصل بين البؤرة وحافة العاكس، وتُعطى بالع
هي الزاوية بين المحور الشاقولي (OZ) والخط الرابط بين البؤرة وحافة العاكس وتعطى بالعلاقة :[3,4,5]

$$\theta_R = \arctan\left[\frac{\frac{w}{f}}{2-\frac{1}{8}\left(\frac{w}{f}\right)^2}\right] \qquad (3\text{-}4)$$



الشكل (4-3) زاوية الحافة لـ PTC

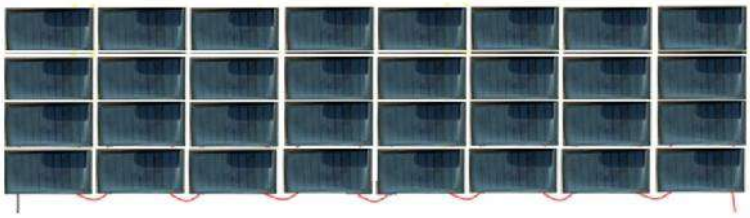
الشكل (4-4) نماذج PTC مصغرة لمحاكاة تجريبية

4.2 النظام الكهروشمسي العادي

يتكوّن النظام الكهروضوئي من مجموعة من الخلايا الشمسية الموصولة لتشكيل الألواح الكهروضوئية، كما هو مبيّن في الشكل (4–5) الذي يعرض نماذج مصغّرة خُصِّصت للمحاكاة التجريبية.

تتألف المنظومة المستخدمة من **32لوحًا شمسيًا**، مُرتَّبة على النحو الآتي:

- **أربعة فروع متوازية،**
- **كل فرع يحتوي على 8 ألواح متسلسلة.**



الشكل (4-5) خلايا كهر وشمسية مصغرة لمحاكاة تجريبية

خصائص اللوح الواحد كما يلي:

خصائص اللوح الواحد
Matériau: poly silicium
Taille : env. 53 x 30 mm
Puissance: 0,15W
Tension: 5V
Courant de fonctionnement: 300mA

لجدول (4-1) **: مكوينات النظام الكهروشمسي PV**:

المادة	**:**بولي سيليكون poly silicium
الأبعاد	53 **:**مم × 30 **مم**0.053 =م0.030×م
مساحة اللوح الواحد	Apanel=0.053×0.030=0.00159 م2
القدرة القصوى للوح الواحد	Pmp,panel=0.15W
جهد الدائرة المفتوحة للوح الواحد	Voc,panel=5 فولت)
جهد التشغيل	4.8 **فولط**
تيار القصر للوح الواحد	Isc,panel =250 mA
تيار التشغيل للوح الواحد	Imp,panel=300 **:ملي** أمبير0.3=أمبير
الإستطاعة العظمى في الاشعاع الشمسي 750w/m²	1,2 w Pmax
عدد الألواح:	32
عدد الألواح في كل فرع (على التسلسل)	**08** ألواح
عدد الفروع المتوازية	4 فروع

تبلغ **الاستطاعة العظمى** تحت إشعاع شمسي مقداره 750 W/m2750 \, W/m^2750W/m2نحو **1.2واط** لكل لوحة.

وهكذا، يبيّن الجدول (4-1) المكونات الأساسية للنظام الكهروضوئي (PV) وخصائصها التقنية .

3.4 الدراسة الضوئية

يستقبل المركز ذو القطع المكافئ الأسطواني (PTC) الإشعاعَ الشمسي المباشر IIIعبر مساحة الفتحة Aap وفق العلاقة:

$$A_{ap} = L.w \qquad (4\text{-}4)$$

يقوم العاكس بتركيز الإشعاع الشمسي المباشر نحو المستقبل، حيث تُحدَّد مساحة الجزء المستقبل الذي يصله الإشعاع المركز بالعلاقة:

$$A_{r,Icr} = 2\theta_R.D_r.L \qquad (5\text{-}4)$$

ويكون تركيز الإشعاع في هذا الجزء وفق العلاقة:

$$C_r = \frac{A_{ap}}{A_{r,Icr}} = \frac{L.w}{2\theta_R.D_r.L} = \frac{w}{2\theta_R.D_r} \qquad (6\text{-}4)$$

أما مساحة الجزء من المستقبل الذي يستقبل الإشعاع المباشر غير المركز فتُعطى بالعلاقة :

$$A_{r,I} = (\pi - 2\theta_R)D_r.L \quad (7\text{-}4)$$

المردود الضوئي:

يعتمد المردود الضوئي لل (PTC) على كلٍّ من **معامل الانعكاس** لسطح العاكس، و**معامل الاعتراض**، و**زاوية ورود الإشعاع الشمسي** iii، ويُعبر عنه بالعلاقة :[6] [7]

$$\eta_{opt} = \rho^0.\gamma.cos\,(i) \qquad (8\text{-}4)$$

تُظهر هذه المعادلات العلاقة بين الخصائص البصرية للسطح العاكس وسلوك الإشعاع المركز، ما يتيح حساب كمية الطاقة الضوئية المتاحة لعمليات التحويل الحراري والكهربائي في النظام الهجين.

4.4 النمذجة الرياضية للخلية الشمسية(PV)

تُعطى الدارة المكافئة للخلية الشمسية الحقيقية كما هو مبيَّن في الشكل (4-4).

تُمثِّل هذه الدارة النموذجَ الكهربائي للخلية الشمسية الذي يعتمد على التيار الضوئي، والمقاومات الداخلية، وجهد الخرج.

وتُعبَّر المعادلات الرياضية الموافقة للعلاقة بين التيار والجهد كما يلي:[4] [8] [9]

$$I_d = I_s\left[\exp\left(\frac{q\,(V + IRs)}{N_s KAT_o}\right) - 1\right] \qquad (9\text{-}4)$$

$$I = Iph - I_s\left[\exp\left(\frac{q(V + IRs)}{N_s KAT_o}\right) - 1\right] \qquad (10\text{-}4)$$

$$I - Np * Iph - Np * I_s\left[\exp\left(\frac{q(V + IRs)}{N_s KAT_o}\right) - 1\right] \qquad (11\text{-}4)$$

$$Ibp = [I^{zc} + K!\,(T^{o} - T^{1})] * \frac{C^{LGL}}{C} \qquad (12\text{-}4)$$

5.4 كفاءة الخلية الكهروضوئية:

لحساب الكفاءة أو المردود الطاقوي للخلية الكهروضوئية، نستخدم المعطيات المتوفرة من المصنع وفق الخطوات الآتية:

1. **حساب مساحة اللوح:(A)**

$$A = LxW \qquad 13\text{-}4$$

2. **تحديد شدة الإشعاع الشمسي (G)** في الشروط القياسية .(STC)

$$3.\quad G = 1000\ \frac{W}{m^2} \qquad 14 - 4$$

3 .حساب الاستطاعة الكهربائية القصوى:(P_{out})

$$P_{out} \ en \ W \qquad 15\text{-}4$$

4 . حساب الكفاءة:(η)

$$\eta = AxGxP_{out}x100 \qquad 16\text{-}4$$

تمكّن هذه النمذجة من تحديد أداء الخلية الشمسية في ظروف التشغيل المختلفة، وتساعد على تقييم مدى فاعلية النظام الكهروضوئي ضمن المنظومة الهجينة.

6.4 المحاكاة التجريبية للنموذج المصغّر

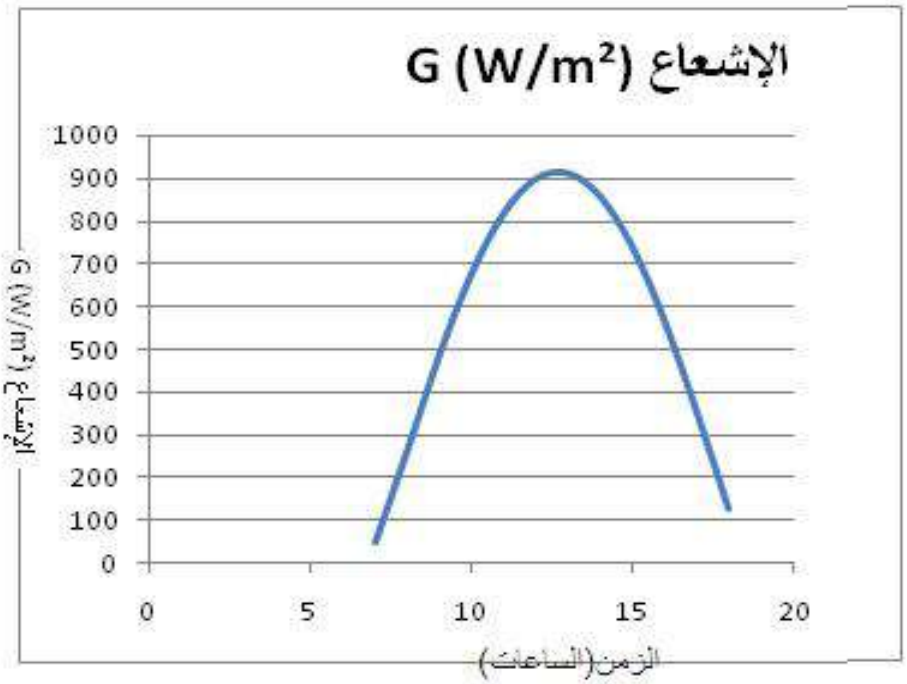
اعتمادًا على النموذج المصغّر لمركز الأشعة ذي القطع المكافئ الأسطواني (PTC) الموضَّح في الشكل (4-3)، وباستخدام خلايا شمسية مصغّرة كما في الشكل (4-5)، تم إجراء محاكاة تجريبية للإشعاع الشمسي ليوم نموذجي في منطقة ورقلة، حيث سُجّلت الاستطاعة الناتجة في كل ساعة من الساعة **07:00صباحًا إلى 18:00 مساءً.**

يُوضح الشكل (4-5) منحنى تغير الإشعاع الشمسي اليومي، بينما يبيّن الجدول (4-2) القيم المقاسة للإشعاع الشمسي خلال اليوم النموذجي:

الشكل (4-5) تسجيلات الإشعاع الشمسي ليوم نموذجي بمنطقة ورقلة

الجدول (4-2): قيم الإشعاع ليوم لمنطقة ورقلة

الساعة	الاشعاع
7	**51** w/m^2
8	**266** w/m^2
9	**488** w/m^2
10	**677** w/m^2
11	**817** w/m^2
12	**897** w/m^2
13	**910** w/m^2
14	**856** w/m^2
15	**739 w/m2**
16	**567 w/m2**
17	**356 w/m2**
18	**129 w/m2**



الشكل (4-6) منحنى الإشعاع اليومي ليوم نموذجي

يُظهر الشكل (4-6) منحنى الإشعاع الشمسي اليومي الذي اعتمد في التحليل اللاحق.

1.5.4 حساب الاستطاعة الناتجة من الألواح الكهروضوئية في الحالة العادية

تم اختيار **ثلاث فترات زمنية** تمثل ذروة الإشعاع الشمسي عند الساعات **12:00** و **13:00** و**14:00**،

وكانت النتائج المتحصَّل عليها كما يلي:

الساعة	الإشعاع G (W/m^2)
12.00	897
13.00	910
14.00	856

وكانت الاستقطاعات المتحصل عليها بالالواح بدون تركيز :

الساعة	الإشعاع G (W/m^2)	الاستطاعة الكهربائية (W)
12.00	897	4.30
13.00	910	4.38
14.00	856	4.10

أمّا عند استعمال النظام الهجين ذي التركيز(PVCT) ، فكانت النتائج كما يلي:

الساعة	الإشعاع G (W/m^2)	الاستطاعة الكلية المحسوبة بالتركيز(W)
12	897	51.07
13	910	51.76
14	856	48.68

وباستعمال الماء كمائع في الانبوب الماص

السعة الحرارية النوعية Cp	4186 J/Kg·K
معدل تدفق المائع m	0.1 Kg/S
درجة الحرارة	35°C

تم حساب الاستطاعة الحرارية وفق العلاقة:

$$Q_{th}=m\times Cp\times \Delta T \qquad (17\text{-}4)$$

الساعة	الاستطاعة الحرارية المحسوبة(W)
12	574.08
13	582.40
14	547.84

وكانت النتائج المحسوبة كالآتي:

الساعة	الاستطاعة الحرارية المحسوبة(W)	التغير في درجة الحرارة(ΔT, °C)	درجة حرارة المائع الخارجة (Tout, °C)
12	574.08	1.37	36.37
13	582.40	1.39	36.39
14	547.84	1.31	36.31

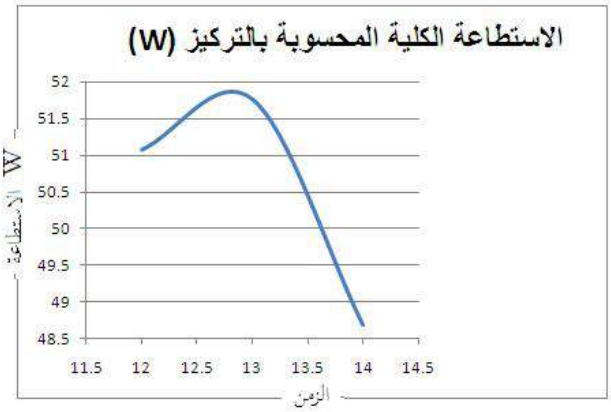
ومنه نحسب الاستطاعة الحرارية لكل ساعة بالعلاقة

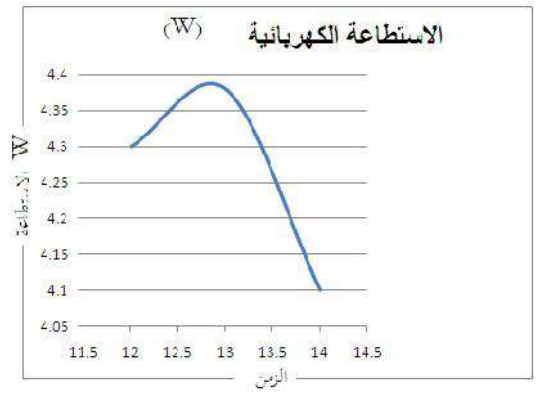
$$Q_{th}=m\times Cp\times \Delta T \qquad (17\text{-}4)$$

الساعة	الاستطاعة الحرارية المحسوبة(W)
12	574.08
13	582.40
14	547.84

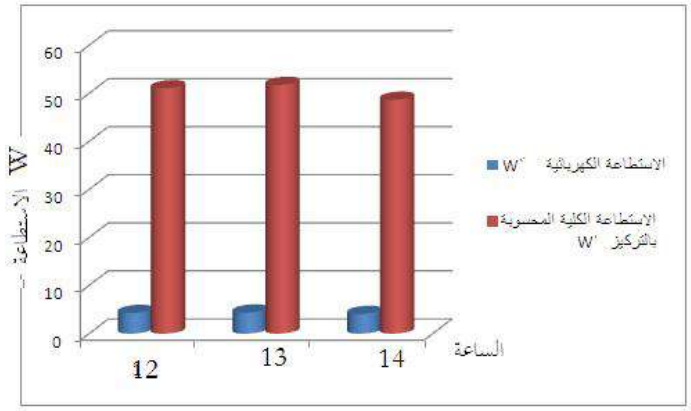
و بالمقارنة للمحصلة في الاستطاعة الكهربائية في الحالتين :

الاستطاعة المنتجة في النظام PV بدون تركيز و الاستطاعة المنتجة بالتركيز





الشكل (4-7-أ) منحنيات المقارنة للاستطاعة الناتجة بالتركيز و بدون تركيز



الشكل (4-7ب)**اعمدة** المقارنة للاستطاعة الناتجة بالتركيز و بدون تركيز

الشكل (4-8) منحنى المحصلة الطاقوية للنظام الهجين النموذج التجريبي المصغر

تُظهر الأشكال (4-7) و(4-8) منحنيات المقارنة بين الاستطاعة الكهربائية الناتجة في حالتي النظام الكهروضوئي العادي والنظام الهجين بالتركيز.

ومن خلال النتائج، تبيَّن أن النظام الهجين (PVCT) زاد من الاستطاعة الكهربائية بأكثر من **عشرة أضعاف** مقارنة بالنظام الكهروضوئي التقليدي، مع إنتاج طاقة حرارية معتبرة نتيجة دمج تقنيتي **التحويل الكهروضوئي والحراري**.

وعليه، تُعد هذه النتائج خطوة مهمة نحو **نمذجة ومحاكاة الأنظمة الهجينة** لإنتاج الطاقة الكهربائية والحرارية في آن واحد.

6.4 الطرائق والأساليب لنمذجة النظام (PTCV) المدروس

في هذه الدراسة النظرية تم اعتماد **نموذج نظام هجين كهروضوئي–حراري مزوّد بمركز شمسي أسطواني ذي قطع مكافئ(PVCT)** ، حيث جرى اختيار المركز الشمسي (PTC) وفق الأبعاد والخصائص الموضحة في الجدول (4-3)

تم تثبيت اللوح الكهروضوئي على الأنبوب الماص بطريقة أسطوانية حول محوره البؤري بحيث يتلقى الإشعاع المركز بصورة متجانسة، بينما يتم تبريد اللوح من خلال مرور المائع الحراري داخل الأنبوب الماص، كما هو موضح في الشكل (4-1)

الجدول (4-3) ابعاد PTC

Length L	**105 cm**
Width W	**160 cm**
Diameter of the absorbent tube D	**4.3 cm**
Geometric concentration C	**11.85**
Acceptance angle	**126.8°**

الجدول (4-4) خصائص اللوح الشمسي

Model No :	FFXS-100W
Solar panel size :	1050*540*2.5mm
Voltage at max power(Vmp):	17.6(V)
Current at max power(Imp):	5.68(A)
Short circuit current(Isc):	6.25(A)
Open circuit voltage(Voc):	20.8(V)
of cells and connections Number	32pcs(4*8)
Operating Temperature :	- 40ºC-+85ºC

تمت مقارنة أداء النظام الهجين المقترح (PVCT) مع نظام مشابه دون تركيز شمسي (PVT) تحت نفس الظروف المناخية لمنطقة **ورقلة** (**جنوب الجزائر**(، التي تمثلها المعطيات الجوية والموقعية المبينة في الجدول(4-5)

اختيرت **فترتان زمنيتان** لتمثيل حالتين مناخيتين متباينتين، هما:

- **يوم شتوي** 15 :جانفي.
- **يوم صيفي** 15 :جويلية.

وقد أُجريت عمليات المحاكاة للنظامين الكهروضوئي والحراري باستعمال برنامج **MATLAB**، مع الأخذ بعين الاعتبار الفرضيات التبسيطية التالية:

1. إهمال عيوب الشكل الهندسي للعاكس.(PTC)
2. تثبيت اللوح الشمسي على الأنبوب الماص بإحكام تام للحفاظ على الشكل الأسطواني المثالي.
3. إهمال سمك اللوح الشمسي في الدراسة الحرارية.
4. اعتبار يومي الدراسة (15 جانفي و15 جويلية) أيامًا صافية خالية من السحب والغبار.

هذه الفرضيات تتيح تبسيط النموذج الرياضي دون التأثير الكبير في دقّة النتائج، مما يسمح بفهم أفضل لسلوك النظام تحت ظروف تشغيل واقعية.

7.4 الدراسة الحرارية للنظام(PVCT)

يستقبل سطح اللوح الكهروضوئي المثبّت على الأنبوب الماص الإشعاعَ الشمسي المركز على جزء من مساحته، بينما يتلقى الجزء الآخر الإشعاعَ المباشر غير المركز. تنتقل الحرارة بعد ذلك من اللوح إلى الأنبوب الماص، ثم إلى المائع الحراري المتدفق داخله، وذلك عبر آليات **انتقال الحرارة الثلاث** :التوصيل، والحمل، والإشعاع.

تُعبّر المعادلات التالية عن موازنة الطاقة الحرارية لمختلف أسطح النظام:

- سطح اللوح الكهروضوئي(PV) ،
- سطح الأنبوب الماص(r) ،
- المائع الحراري.(f)

1.7.4 سطح اللوح الكهروضوئي(PV)

يتلقى اللوح الكهروضوئي الإشعاع الشمسي المركز الذي يُحوَّل جزء منه إلى طاقة كهربائية، بينما يتحول الجزء المتبقي إلى طاقة حرارية تُنقل نحو الأنبوب الماص. وتعتمد كمية الطاقة المنتقلة على الخواص الفيزيائية للمواد المستعملة وعلى معامل التوصيل الحراري للوصلات بين السطح والأنبوب.

$$\rho_{PV}.e_{PV}.Cp_{PV}.\frac{dT_{PV}}{dt} = I.\frac{A_{ap}}{A_{PV}} + h_r(T_{Sky} - T_{PV}) + h_{Cv1}(T_a - T_{PV}) + h_{cn}(T_r - T_{PV}) \qquad (14-4)$$

2.7.4 سطح الأنبوب الماص(r)

يعمل الأنبوب الماص على استقبال الحرارة من اللوح الكهروضوئي ونقلها إلى المائع المتدفق بداخله.

وتُعطى المعادلات الحرارية التي تصف هذه العملية كما يلي:

$$\rho_r.e_r.Cp_r.\frac{dT_r}{dt} = h_{cn}(T_{PV} - T_r) + h_{Cv2}(T_f - T_r) \qquad (15\text{-}4)$$

3.7.4 المائع الحراري(f)

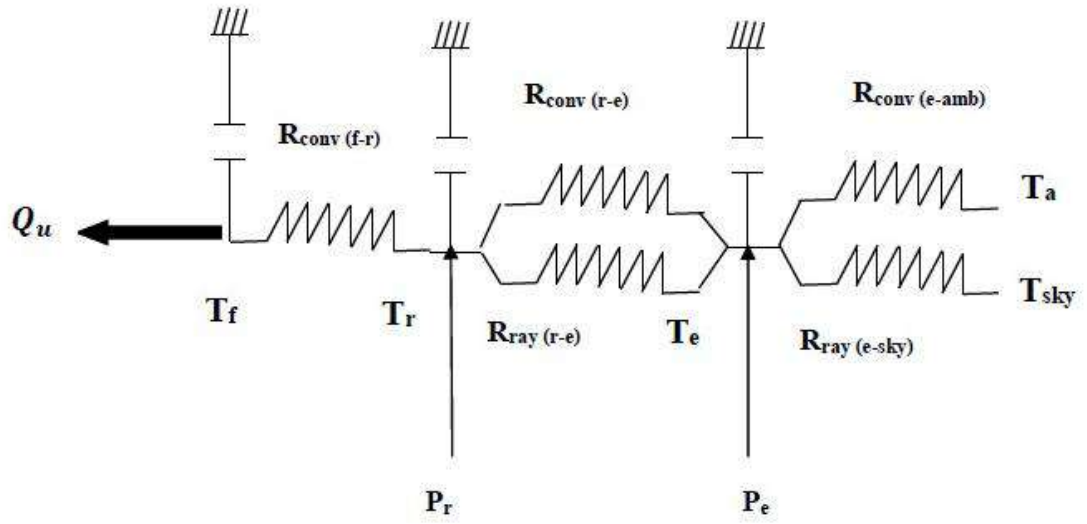
تزداد درجة حرارة المائع نتيجة امتصاصه للطاقة الحرارية المنتقلة من الأنبوب الماص، وتُعبّر عن هذه العلاقة بالمعادلة:

$$G.Cp_f.dT_f = h_{Cv2}(T_r - T_f) \qquad (16\text{-}4)$$

أما المردود الحراري للنظام الهجين فيُحسب بالعلاقة:

$$\eta_{th} = \frac{G.Cp_f(T_{fs}-T_{fe})}{I.A_{ap}.\eta_{op}} \qquad (17\text{-}4)$$

4.7.4 مخطط المماثلة الكهربائية للنظام الحراري المدروس للمجمع (PTC)



مخطط المماثلة الكهربائية للنظام الحراري المدروس للمجمع (PTC).

الشكل (4-9) مخطط المماثلة الكهربائية للنظام

يُوضّح **مخطط المماثلة الكهربائية للنظام الحراري** (Thermal Network Equivalent Circuit) طريقة تحليل انتقال الحرارة في المجمع الشمسي ذي القطع المكافئ.(PTC)

في هذا المخطط تُقابَل درجات الحرارة بالجهود الكهربائية، وتدفّقات الحرارة بالتيارات الكهربائية، والمقاومات الحرارية بالمقاومات الكهربائية، وهو ما يُتيح تحليلًا منهجيًا دقيقًا لعمليات انتقال الطاقة داخل النظام[10].

الخاتمة

من خلال هذه النمذجة الرياضية يمكننا محاكاة نموذجٍ أكبر بالأبعاد الحقيقية للنظام الهجين الكهروضوئي–الحراري ذي المركز الشمسي الأسطواني(PVCT) ، مع حساب مختلف القيم الخاصة بالقدرات الكهربائية والحرارية، وتحديد المردود الطاقوي العام للنظام.

تُظهر النتائج أن الدمج بين تقنيتَي التحويل الكهروضوئي والتحويل الحراري في نظام واحد يساهم في **رفع الكفاءة الإجمالية للطاقة الشمسية** المستغلة، من خلال الاستفادة المتزامنة من الإشعاع الشمسي في إنتاج الكهرباء والحرارة.

كما تسمح النمذجة المقترحة بفهمٍ أفضل لتأثير المتغيرات المناخية والهندسية على أداء النظام، مما يفتح المجال لتصميم أنظمة هجينة أكثر فاعلية في الاستخدامات الطاقوية المستقبلية، خصوصًا في المناطق الصحراوية الغنية بالإشعاع الشمسي مثل **منطقة ورقلة بالجزائر**.

مراجع الفصل الرابع

[1] X. Zhao, X. Li, S. Wang, and T. Ma, "Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal solar system with dual heat sinks," *Applied Energy*, vol. 194, pp. 269–282, 2017.

[2] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, Academic Press, 2009.

[3] T. T. Chow, W. He, and J. Ji, "Hybrid photovoltaic–thermosyphon water heating system for residential application," *Solar Energy*, vol. 80, no. 3, pp. 298–310, 2010.

[4] E. Bellos and C. Tzivanidis, "Multi-criteria evaluation of parabolic trough collector systems," *Renewable Energy*, vol. 121, pp. 622–632, 2018.

[5] J. Huang, P. Hu, W. Li, and J. Zheng, "Experimental study of a photovoltaic–thermal solar system," *Energy Conversion and Management*, vol. 122, pp. 305–313, 2016.

[6] D. Bechki, S. Chihi, K. E. Aiadi, and M. E. Soudani, "Experimental and theoretical study of parabolic trough collector (PTC) with a flat glass cover in the region of Algerian Sahara (Ouargla)," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 31, no. 8, pp. 4003–4009, 2017.

[7] A. Bellini, S. Bifaretti, V. Iacovone, and C. Cornaro, "Simplified model of a photovoltaic module," in *Applied Electronics Conference (IEEE)*, 2009, pp. 47–51.

[8] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values," in *Industrial Electronics Conference (IEEE)*, 2007, pp. 2392–2396.

[9] R. Kumar, S. K. Singh, and Vinod, "Solar photovoltaic modeling and simulation: As a renewable energy solution," *Energy Reports*, vol. 4, pp. 701–712, 2018.

[10] A. Benrezkallah, Y. Marif, M. E. Soudani, M. M. Belhadj, T. Hamidatou, N. Mekhloufi, and A. Aouachir, "Thermal performance evaluation of the parabolic trough solar collector using nanofluids: A case study in the desert of Algeria," *University of Kasdi Merbah Ouargla*, Algeria.

الفصل الخامس : تحليل ومناقشة النتائج

المقدمة

أُجريت هذه الدراسة في منطقة ورقلة خلال أشهر من فصلي الشتاء والصيف، حيث تم اختيار شهري **جانفي** و**جويلية** لتمثيل أدنى وأعلى درجات الحرارة على التوالي، وكذلك لتباين شدة الإشعاع الشمسي خلال السنة.

اعتمادًا على جدول قياس الإشعاع الشمسي ودرجات الحرارة ليوم نموذجي في منطقة ورقلة، المبيَّن في الجدول (5-1)، يمكن ملاحظة التغيرات في شدة الإشعاع الشمسي خلال اليوم.

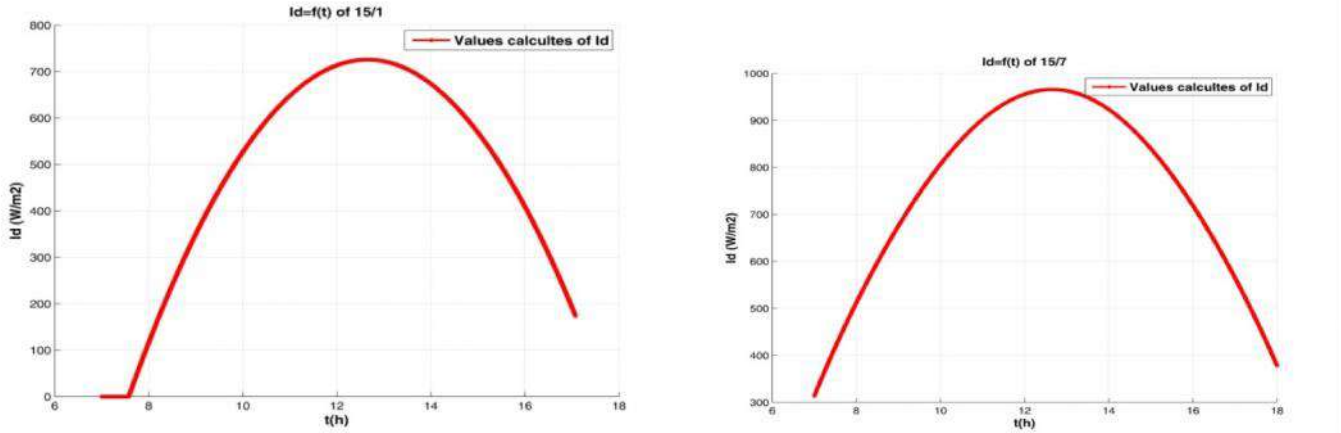
جدول (5-1) شدة االشعاع الشمسي في مدينة ورقلة ببدلالة الزمن

الإشعاع الشمسي w/m^2	درجات الحرارة °C	التوقيت
558	34,3	08:00
692	35,6	08:30
762	36,4	09:00
812	37,4	09:30
860	38,2	10:00
897	39,4	10:30
910	40,1	11:00
929	40,7	11:30
932	43,9	12:00
944	41,1	12:30
949	43,3	13:00
933	45	13:30
917	43,5	14:00
912	44,7	14:30
897	46,2	15:00
886	46,9	15:30
864	45,8	16:00
830	45,3	16:30
769	45,3	17:00
685	44,8	17:30

يتضح من المعطيات أن الإشعاع في المنطقة يصل إلى **944واط/م²**، لذلك تم اختيار يوم **15جانفي** ويوم **15جويلية** باعتبارهما يمثلان ذروة الإشعاع خلال فصلي الشتاء والصيف على التوالي.

تم تسجيل تغيرات الإشعاع الشمسي لهذين اليومين من الساعة **07:00**صباحًا إلى **17:00**مساءً، واستُخرجت منها القيم المتعلقة بمنحنيات الاستطاعة الكهربائية المولدة من الألواح الشمسية، وكمية الحرارة الممتصة، وكذلك الخصائص الكهروحرارية للنظام الهجين .(**PVCT**)

1.5 خاصية الإشعاع الشمسي لمنطقة ورقلة



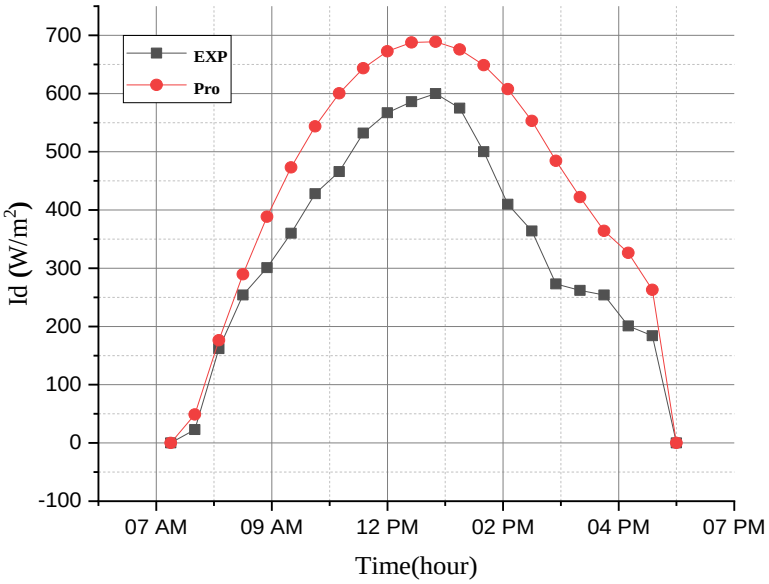
الشكل (5-1) تغير الإشعاع الشمسي بدلالة الزمن ليومي 15جانفي و 15 جويلية

يُبيّن الشكل (5-1) تغيّر شدة الإشعاع الشمسي بدلالة الزمن ليومي **15جانفي** و **15جويلية**.

من خلال هذا الشكل نلاحظ أن شدة الإشعاع الشمسي في منطقة ورقلة تزداد تدريجيًا منذ شروق الشمس لتبلغ ذروتها عند منتصف النهار، ثم تتراجع تدريجيًا حتى الغروب.

وتصل شدة الإشعاع القصوى في شهر **جانفي** إلى حوالي **730واط/م²**، بينما تبلغ في شهر **جويلية** حوالي **970واط/م²**.

بالمقارنة مع النتائج التجريبية الموضّحة في الشكل (5-2)، يتضح مدى تطابق المحاكاة العددية مع البيانات الفعلية المسجلة، مما يؤكد دقة النموذج المستخدم في الدراسة [1].



الشكل5-2 قيم الإشعاع الشمسي التجريبية وقيم المحاكاة لمنطقة ورقلة

تمحور عملنا حول دراسة **ثلاث طرق** لحساب الخصائص المطلوبة ومقارنتها، وهي كما يلي:

أولاً :حساب واستخلاص الخصائص الكهروشمسية ليومي **15جانفي** و **15جويلية** للنموذج الأول، وهو النظام الكهروضوئي التقليدي (**PV**)، حيث تُوزَّع الألواح الشمسية على سطح مستوٍ دون تركيز للإشعاع.

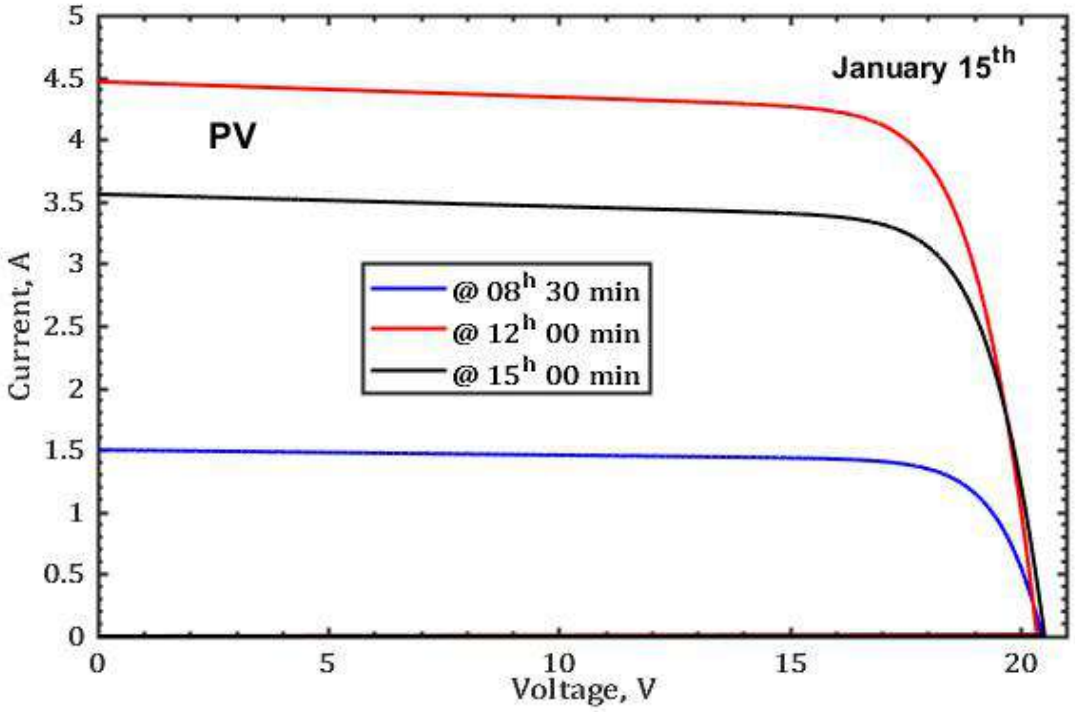
ثانيًا :حساب واستخلاص الخصائص الكهروشمسية ليومي **15جانفي** و **15جويلية** للنموذج الثاني، وهو نظام (**PVC**)الذي يعتمد على تركيز الإشعاع الشمسي باستخدام المجمّع القطع المكافئ.

ثالثًا :حساب واستخلاص الخصائص الكهروشمسية والحرارية ليومي **15جانفي** و **15جويلية** للنموذج الثالث، وهو النظام الهجين الكهروشمس–الحراري المركز .(**PVCT**).

2.5 الخاصيةI–V

- **في حالة نشر الخلايا بدون تركيز الاشعة ، عدم حدوث تركيز للإشعاع الشمسي**

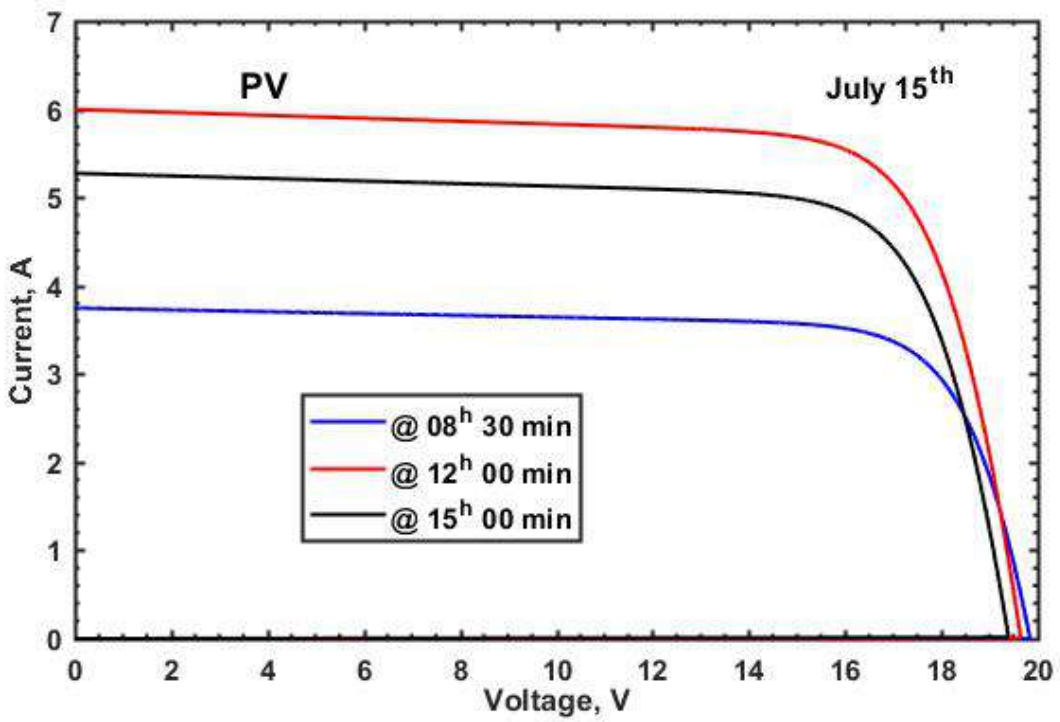
عند نشر الخلايا الكهروضوئية دون تركيز للإشعاع الشمسي، أي في النظام التقليدي **PV**، نلاحظ من الشكل (5-2) أن شدة التيار الأعظمية عند منتصف النهار يوم **15جانفي** تبلغ **4.5أمبير**، وتنخفض إلى **3.6 أمبير** على الساعة الثالثة بعد الظهر، بينما تسجّل قيمة **1.5أمبير** عند الشروق والغروب (على التوالي عند 08:30 و17:00). ويظلّ الجهد ثابتًا عند قيمة **21.2فولت** تقريبًا، وذلك تبعًا لتغيّر شدة الإشعاع الشمسي في منطقة ورقلة من الشروق إلى الغروب.



الشكل (5-2) تغير شدة التيار بدلالة الجهد ليوم 15 **جانفي**

أما في يوم **15جويلية**، ومن خلال الشكل (5-3)، فإن شدة التيار الأعظمية عند منتصف النهار تبلغ **7.2أمبير**، وتنخفض إلى **5.4أمبير** عند الساعة الثالثة بعد الظهر، وتصل إلى **3.8أمبير** عند الشروق

والغروب، مع بقاء الجهد ثابتًا عند **20.8فولت**. وهذا التغيّر في التيار يعكس العلاقة المباشرة بين شدة الإشعاع الشمسي وشدة التيار المتولد، في حين لا يظهر تأثير واضح للإشعاع على الجهد الكهربائي للألواح.



الشكل (5-3) تغير شدة التيار بدلالة الجهد ليوم 15 جويلية

جدول 5-2 : شدة التيار و الجهد المسجلين ليومي 15 جانفي و15 جويلية لنظام PV بدون تركيز

الزمن	شدة التيار (A)		الجهد (V)	
	يوم 15 جانفي	يوم 15 جويلية	يوم 15 جانفي	يوم 15 جويلية
08h30	1.5	3.8	21.2	20.8
12h.00	4.5	7.2	21.2	20.8
15h.00	3.6	5.4	21.2	20.8
17h00	1.5	3.8	21.2	20.8

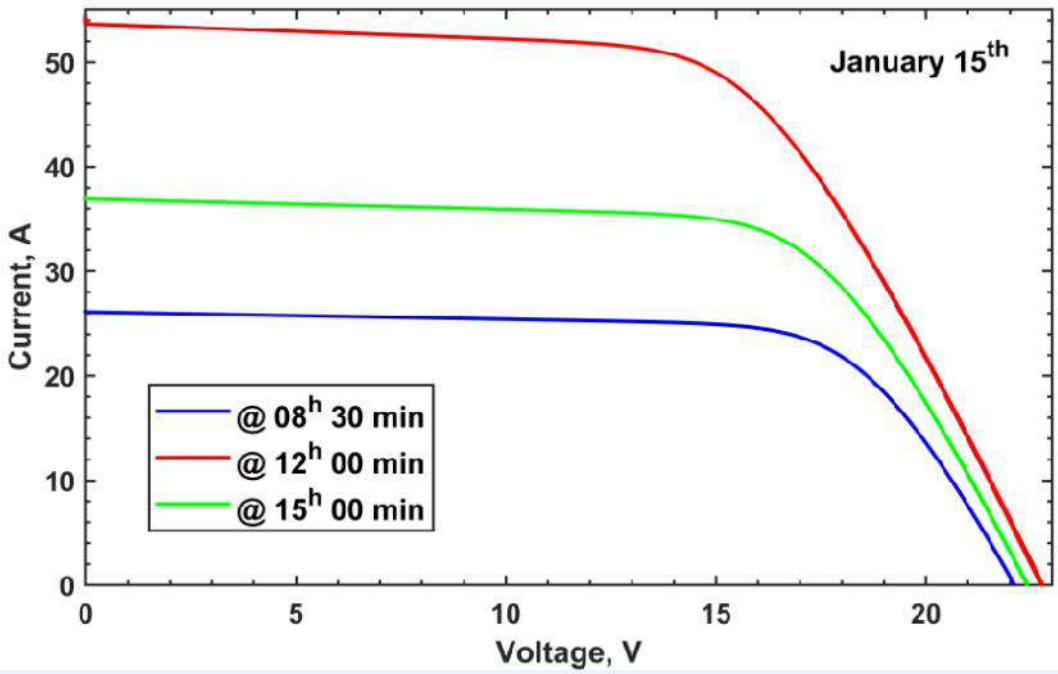
يُظهر الجدول (5-2) القيم المسجلة لشدة التيار والجهد ليومي **15جانفي** و **15جويلية** في النظام الكهروضوئي التقليدي بدون تركيز.

من خلال تحليل المعطيات يتضح أن **الجهد الكهربائي للخلايا الكهروضوئية يبقى ثابتًا تقريبًا طوال فترة الإشعاع الشمسي**، بينما تتغير **شدة التيار** تبعًا لتغيّر شدة الإشعاع، أي أن المتغير الرئيس في هذا السياق هو التيار، في حين لا تتأثر قيمة الجهد بتغير الإشعاع.

- **في حالة تركيز الأشعة بنظام المركز القطع المكافئ**

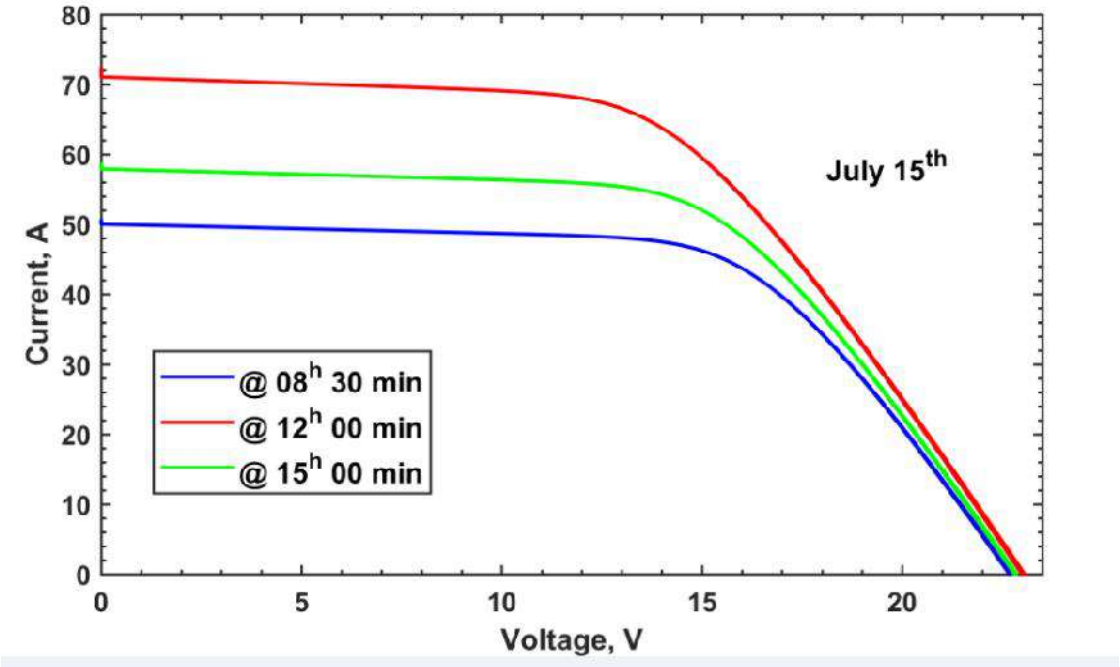
في حالة تركيز الإشعاع الشمسي باستخدام نظام المركز القطع المكافئ (**PTC**)، نلاحظ من الشكل (5-4) أن شدة التيار الأعظمية عند منتصف النهار في يوم **15جانفي** تبلغ **54أمبير**، وتنخفض إلى **37 أمبير** عند الساعة الثالثة بعد الظهر، في حين تسجَّل قيمة **25أمبير** عند الشروق والغروب (08:30 و17:00).

أما الجهد الكهربائي فيبقى متقاربًا ضمن المجال بين **22و23 فولتًا**، وذلك تبعًا لتغيّر شدة الإشعاع الشمسي



الشكل (5-4) تغير شدة التيار بدلالة الجهد ليوم 15 جانفي بتركيز الاشعة

وفي يوم **15جويلية**، كما يبيِّن الشكل (5-5)، تسجّل شدة التيار الأعظمية عند منتصف النهار **70أمبيرًا**، وتنخفض إلى **58أمبيرًا** عند الثالثة بعد الظهر، وتبلغ **50أمبيرًا** عند الشروق والغروب، مع بقاء الجهد الكهربائي ثابتًا تقريبًا بين **22و23 فولتًا**.



الشكل (5-5) تغير شدة التيار بدلالة الجهد ليوم 15 جويلية بتركيز الأشعة

جدول 5-3 : شدة التيار و الجهد المسجلين ليومي 15 جانفي و15 جويلية لنظام PVC بتركيز الأشعة

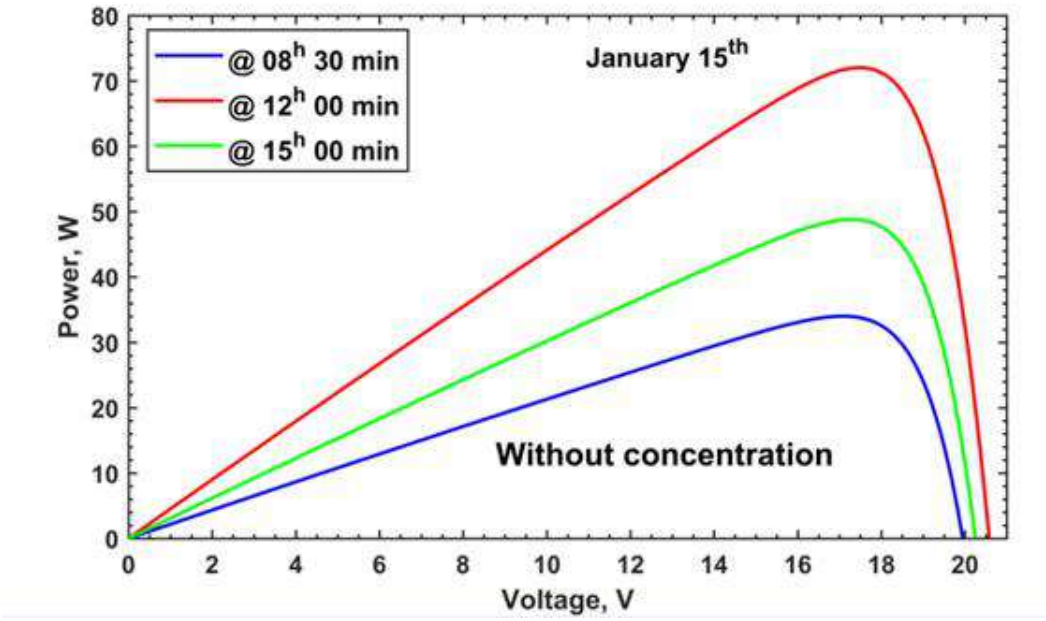
الزمن	شدة التيار (A)		الجهد (V)	
	يوم 15 جانفي	يوم 15 جويلية	يوم 15 جانفي	يوم 15 جويلية
08h30	25	50	22 - 23	22 - 23
12h.00	54	70	22 - 23	22 - 23
15h.00	37	58	22 - 23	22 - 23
17h00	25	50	22 - 23	22 - 23

يُوضّح الجدول (5-3) القيم المسجلة لشدة التيار والجهد ليومي **15جانفي** و **15جويلية** في نظام **PVC** عند تركيز الإشعاع الشمسي.

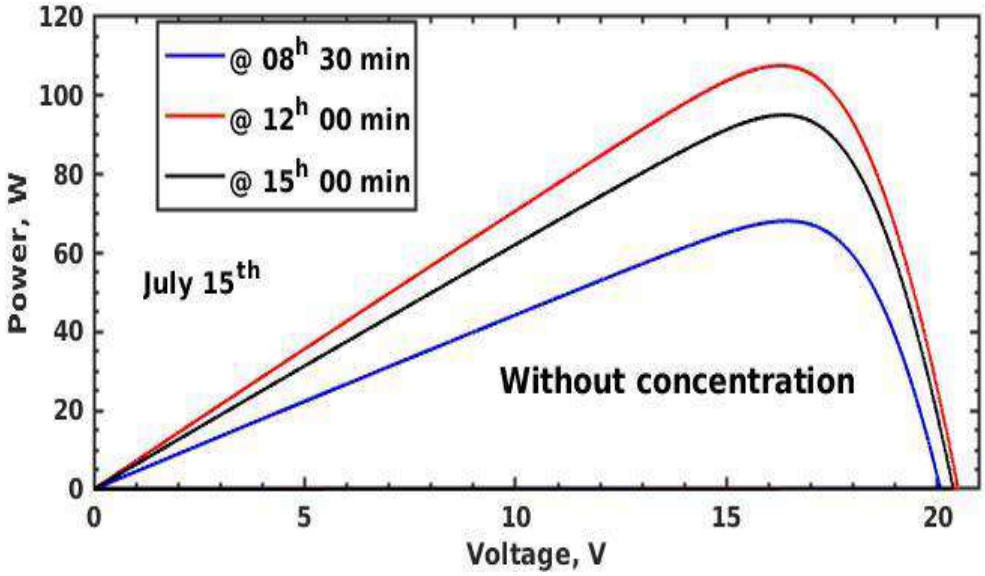
ومن خلال تحليل هذه النتائج يتّضح الفارق الكبير في شدة التيار الناتجة عن استخدام نظام التركيز، إذ تصل إلى أكثر من **50أمبير** في فصل الشتاء، وإلى نحو **70أمبير** في فصل الصيف، مع ثبات الجهد عند حوالي **23 فولتًا**. وهذا يدلّ بوضوح على التأثير الإيجابي الكبير لتركيز الإشعاع في **زيادة التيار المنتج** دون التأثير على استقرار الجهد.

3.5 الخاصية P–V

من خلال الشكلين (**5–6**)و (5-7) ، نلاحظ أنه في حالة عدم تركيز الإشعاع الشمسي، تبلغ **الاستطاعة الأعظمية** عند منتصف النهار في يوم **15جانفي** حوالي **87واطًا**، بينما تصل في نفس التوقيت من يوم **15جويلية** إلى نحو **110واط**.

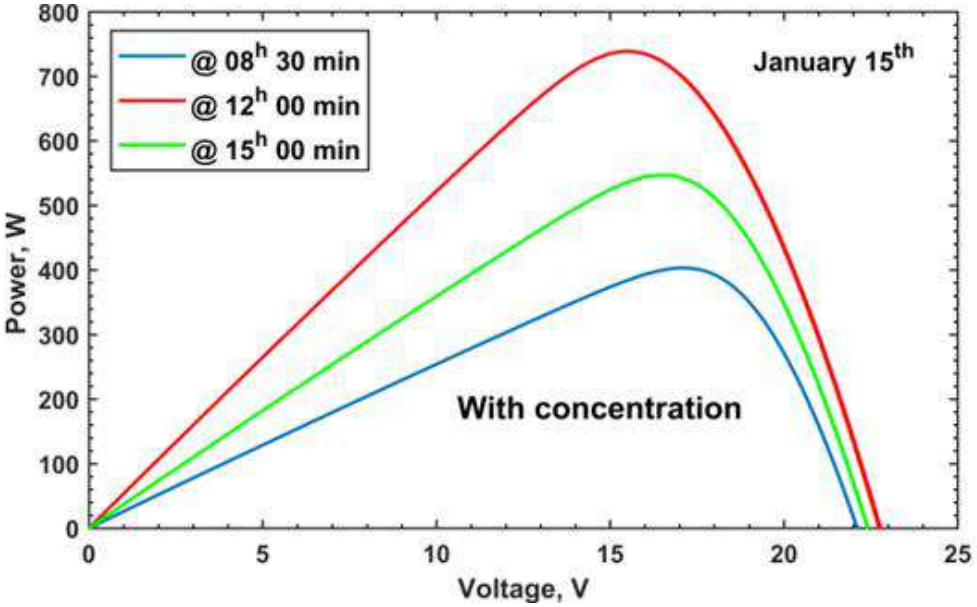


الشكل (5-6) : الاستطاعة و الجهد بدون تركيز الاشعة ليوم 15 جانفي

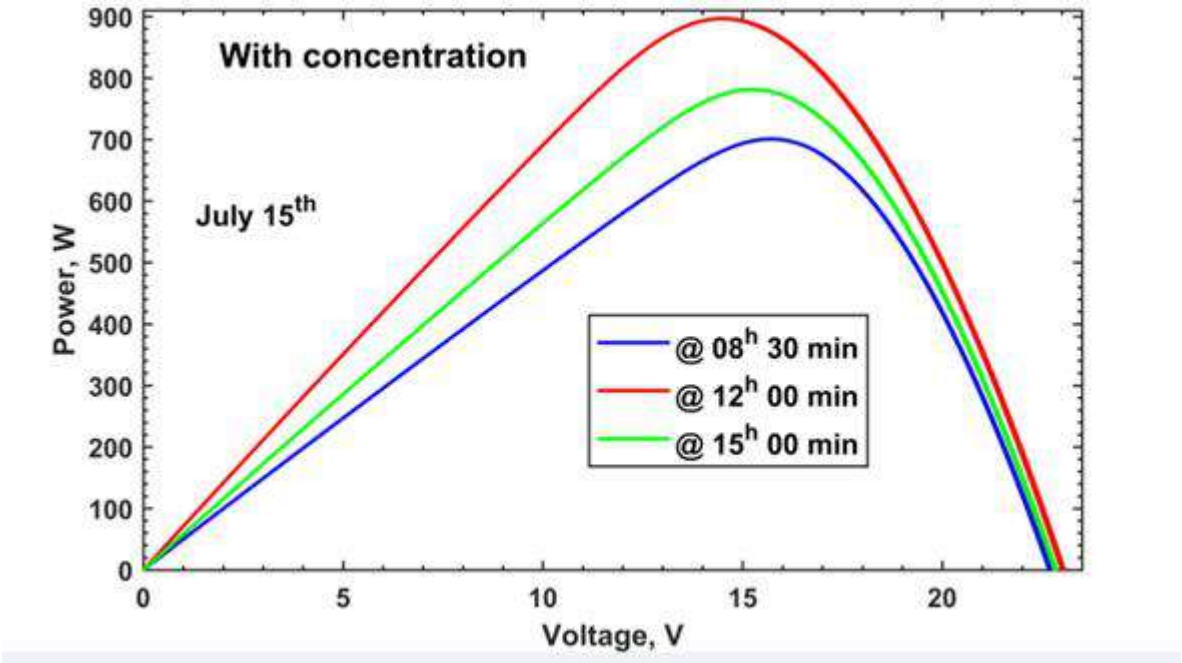


الشكل (5-7) تغير الاستطاعة بدلالة الجهد بدون تركيز الاشعة ليوم 15 جويلية

أما في حالة تركيز الإشعاع الشمسي باستخدام المجمّع القطع المكافئ (**PTC**)، فتزداد الاستطاعة الأعظمية يوم **15جانفي** لتبلغ حوالي **700واط** عند منتصف النهار، ثم تتراجع تدريجيًا إلى نحو **400واط** كما هو مبيَّن في الشكل (5-7) وفي يوم **15جويلية**، تصل الاستطاعة الأعظمية إلى حوالي **900واط** عند منتصف النهار، وتنخفض إلى قرابة **400واط** عند الساعتين **08:00**و**17:00**، كما هو موضح في الشكل (5-8).



الشكل (5-7) تغير الاستطاعة بدلالة الجهد بتركيز الاشعة ليوم 15 جانفي

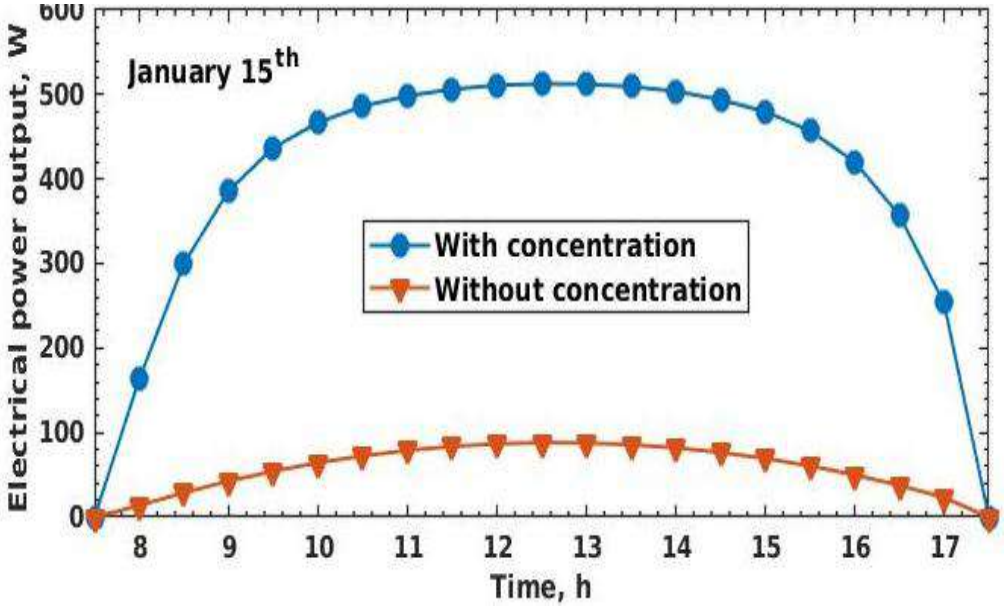


الشكل (5-8) تغير الاستطاعة بدلالة الجهد بتركيز الأشعة ليوم 15 جويلية

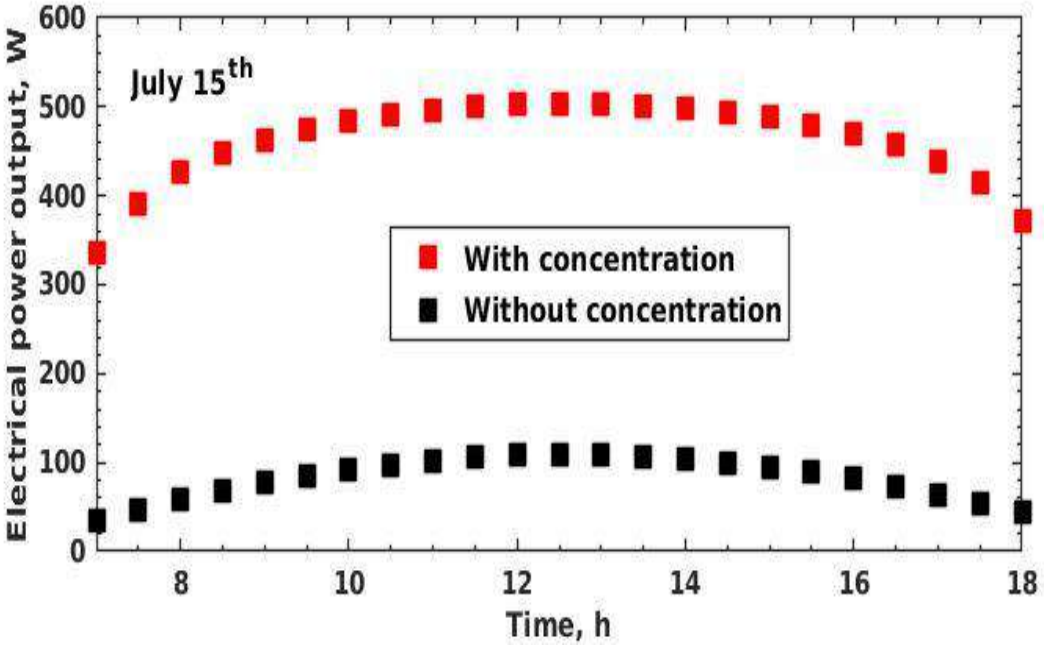
وتُبرز هذه النتائج التأثير الواضح لتركيز الإشعاع على رفع الاستطاعة المنتجة من الألواح الشمسية، إذ يؤدي التركيز إلى تضاعف القدرة الكهربائية الناتجة مقارنة بالنظام الكهروضوئي العادي.

4.5 الخاصية P(t)

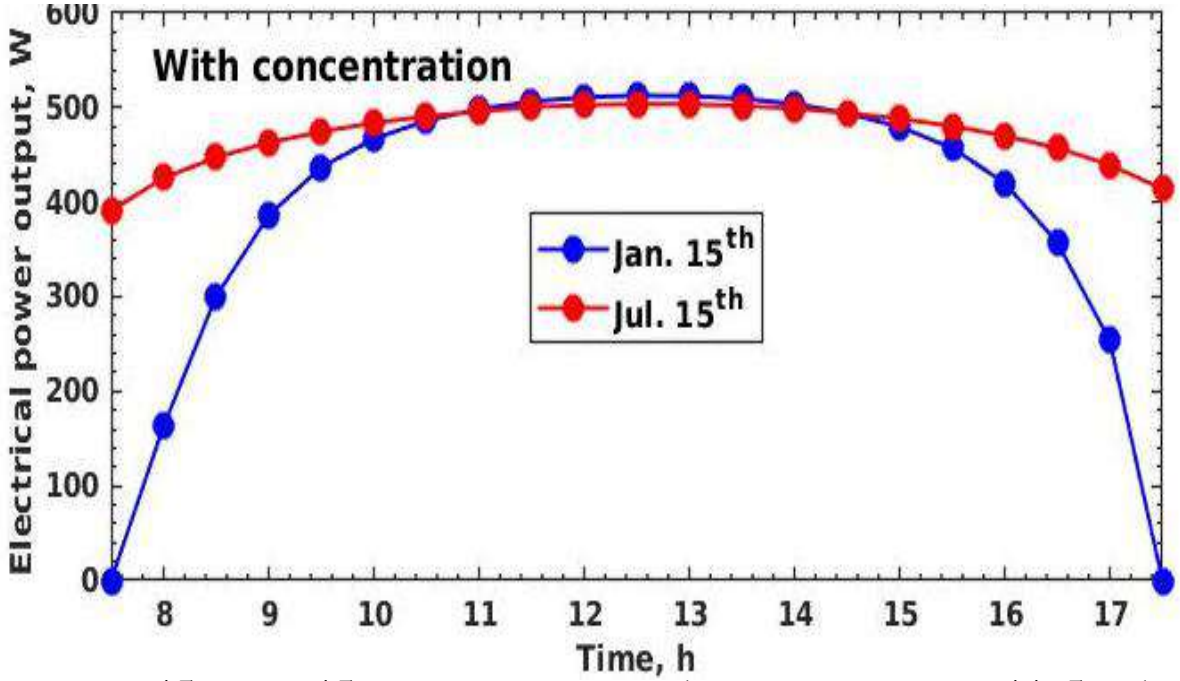
تُعبّر **عن** الاستطاعة الكهربائية المنتجة بدلالة زمن التشميس، وذلك من الساعة **08:00** صباحًا إلى الساعة **17:00** مساءً.في الحالتين (العادية و بالتركيز) :



الشكل (5-9) الاستطاعة الكهربائية المنتجة في الحالة العادية و بالتركيز ليوم 15 جانفي



الشكل (5-10) الاستطاعة الكهربائية المنتجة في الحالة العادية و بالتركيز ليوم 15 جويلية



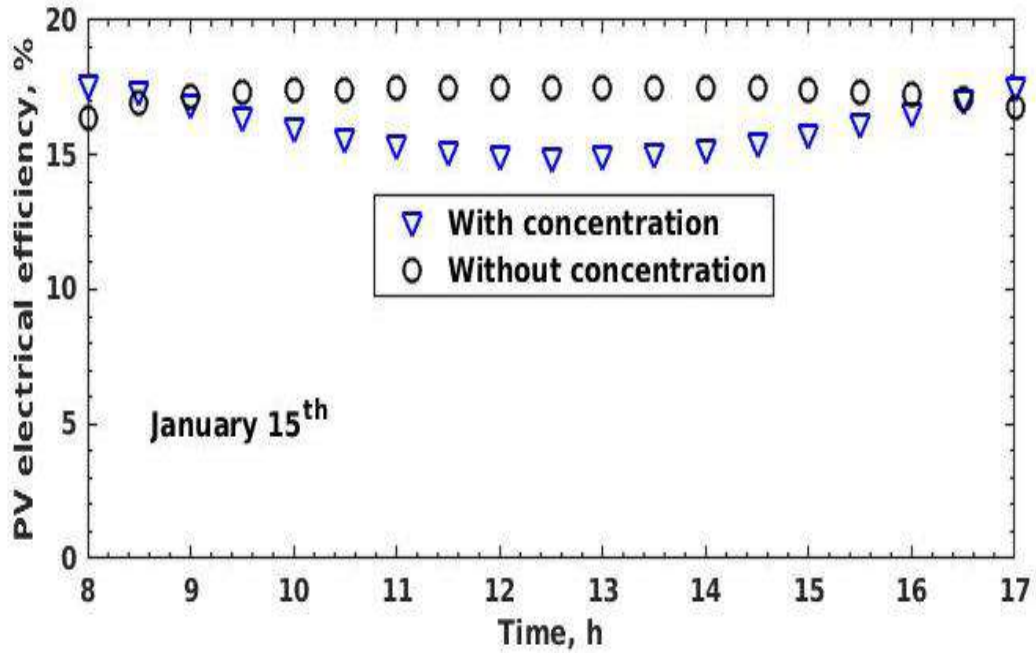
الشكل (5-11) منحنى المقارنة للاستطاعة الكهربائية المنتجة بالتركز ليومي 15 جانفي و 15 جويلية

من خلال ممحنيات الشكل (5-9) و الشكل (5-10)و الشكل(5-11) ، نلاحظ أنه في حالة عدم تركيز الإشعاع الشمسي، تبلغ الاستطاعة الأعظمية الناتجة عند منتصف النهار يوم 15جانفي نحو 87واطًا، بينما تصل في اليوم نفسه من شهر جويلية إلى حوالي **110واط**،

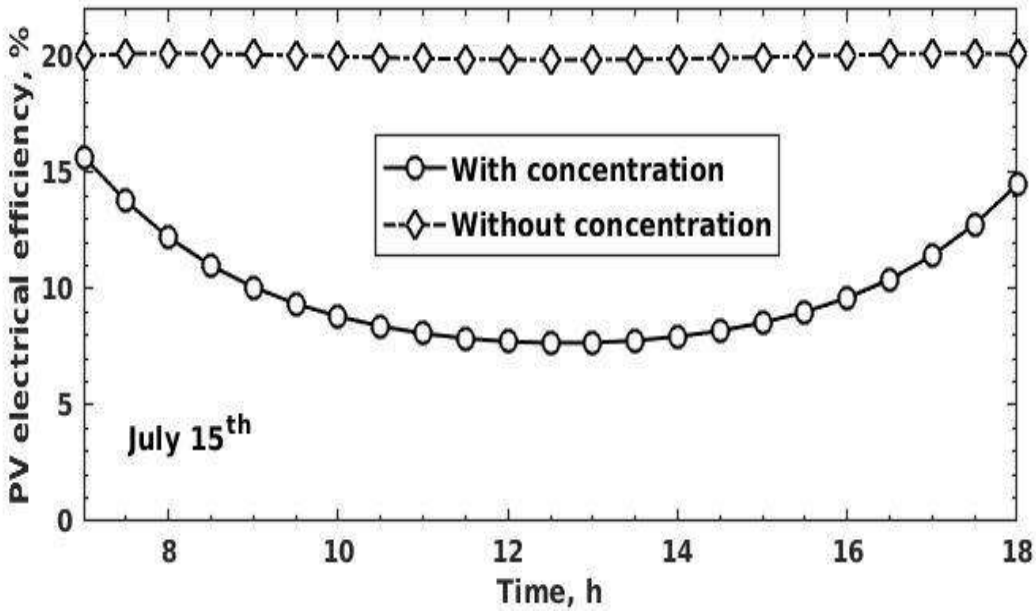
أما في حالة تركيز الإشعاع الشمسي باستخدام المجمّع القطع المكافئ (PTC)مع إدراج مائع تبريد لامتصاص الحرارة الناتجة عن الألواح، فقد بلغت الاستطاعة الأعظمية يوم 15**جانفي** حوالي 515**واط** خلال فترة تشميس تدوم ست ساعات تقريبًا، قبل أن تبدأ بالتراجع التدريجي. في حين تبقى الاستطاعة الأعظمية في يوم 15 جويلية مستقرة نسبيًا بين 400و500 **واط** طوال فترة التشميس، وتصل إلى ذروتها عند منتصف النهار.

تؤكد هذه النتائج أن إدراج نظام التبريد في النظام الهجين **PVCT** يسهم بفعالية في تحسين الأداء الكهربائي، إذ يساعد على خفض درجة حرارة الألواح، وبالتالي الحفاظ على مردود كهربائي مرتفع ومستقر.

5.5 المردود الكهربائي للنظام



الشكل (5-12) المردود الكهربائي ليوم 15 جانفي بدلالة ساعات التشميس



الشكل (5–13) المردود الكهربائي ليوم 15 جويلية بدلالة ساعات التشميس

يتضح من خلال تحليل الأداء أن تركيز الإشعاع الشمسي باستخدام المجمّع القطع المكافئ (PTC) يؤثر بشكل مباشر على المردود الكهربائي للنظام.

ففي يوم 15جانفي، يبدأ المردود الكهربائي عند حوالي 21%، ثم يتراجع تدريجيًا مع ارتفاع درجة الحرارة ليصل عند منتصف النهار إلى نحو 12%، قبل أن يعود للارتفاع مجددًا بعد الزوال نتيجة انخفاض درجة الحرارة.

أما في يوم 15جويلية، فيبدأ المردود عند 16%، ثم يتراجع بسبب الارتفاع الكبير في درجة الحرارة ليبلغ حوالي 8% عند الزوال، ثم يرتفع تدريجيًا بعد ذلك.

وفي المقابل، عند عدم تركيز الإشعاع الشمسي، يبقى المردود الكهربائي مستقرًا نسبيًا طوال فترة التشميس، إذ يسجّل حوالي 18%يوم 15جانفي و 20%يوم 15جويلية.

ويُلاحظ أن الارتفاع المفرط في درجة حرارة الألواح في حالة التركيز يؤدي إلى تراجع واضح في المردود الكهربائي، مما يبرز أهمية التحكم الحراري للحفاظ على كفاءة النظام الكهروشمي الهجين.

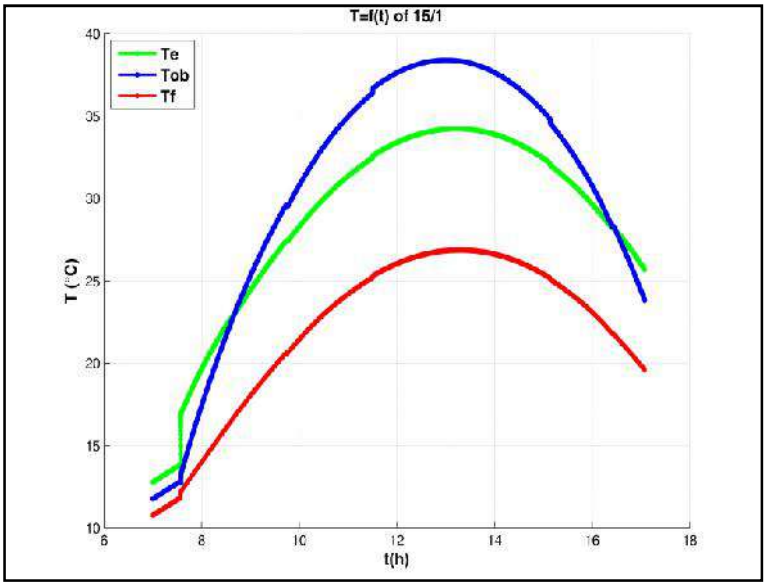
و بالرغم من هذا نلاحظ من الشكل (5-11) بان الاستطاعة الكهربائية المنتجة بالتركيز ليوم 15 جويلية يكون اكبر من 400 W و تبقى مسنقرة من الساعة 08.00 الى الساعة 17.00 بالمقارنة مع الاستطاعة المنتجة يوم 15 جانفي لا تصل الى نفس القيمة الى في الفترة بين الساعة 10.00 و 15.00.

6.5 الطاقة الحرارية النظام الهجين

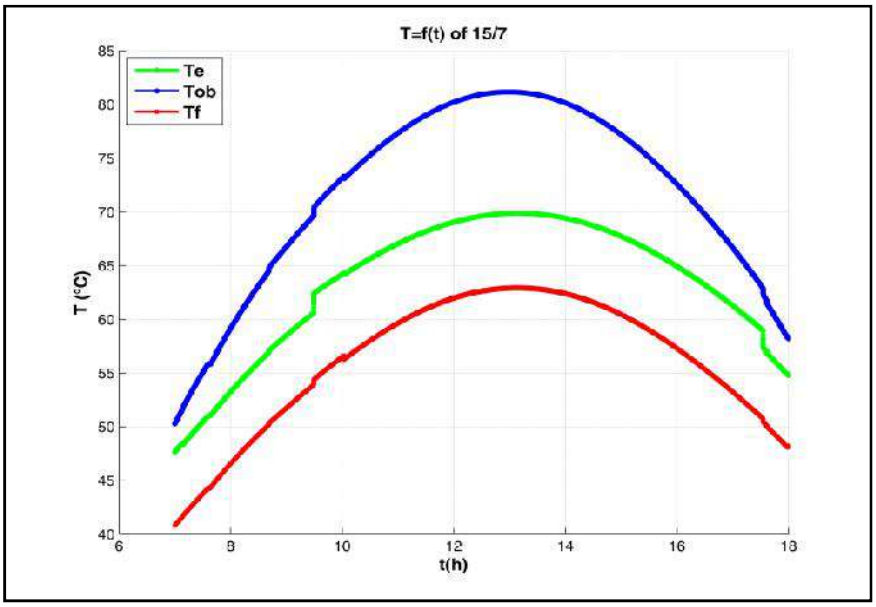
من منحنى درجات الحرارة ليوم 15 جانفي وليوم 15 جويلية ينتج النظام الكهرو-شمسي الهجين.طاقة حرارية معتبرة وفق لدرجة حرارة المائع **و مقدار تدفّقه** .

1.6.5 درجة حرارة المائع في النظام الهجين

من الشكل(5-14)و الشكل (5-15) بتدفّق مائع (ماء) بمعدل **0.05كغ/ثانية**، نلاحظ أن **درجة حرارة المائع** ترتفع تدريجيًا منذ شروق الشمس لتصل إلى الذروة عند منتصف النهار .في يوم **15جانفي** تبلغ درجة حرارة المائع حوالي **27°C**، بينما تصل في يوم **15جويلية** إلى نحو **63°C**، ثم تبدأ بالتراجع تدريجيًا بعد الزوال حتى الغروب.يمكن الاستفادة من المائع الساخن الناتج في **مختلف التطبيقات الحرارية** ذات الدورات المغلقة أو المفتوحة، مثل التسخين أو التشغيل الحراري.وفي الوقت نفسه، يساهم هذا التدفق في **تبريد الألواح الشمسية**، مما يؤدي إلى **رفع المردود الكهربائي للنظام الهجين(PVCT)** ، حيث يجمع هذا النظام بين الاستفادة الحرارية والكهربائية من الطاقة الشمسية في آنٍ واحد.



الشكل (5-14) درجة حرارة المائع المبرد للألواح الشمسية ليوم 15 جانفي

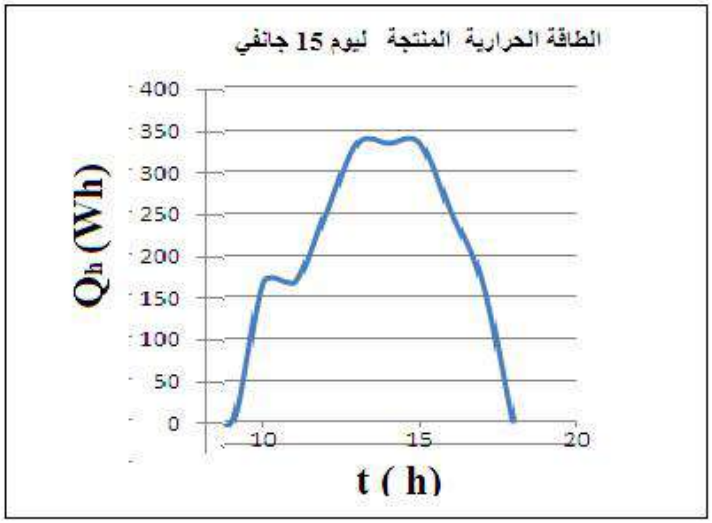


شكل (5-15) درجة حرارة المائع المبرد للالواح الشمسية ليوم 15جويلية

2.6.5 الطاقة الحرارية المنتجة في النظام الهجين :

جدول (5-4) الطاقة الحرارية المتتجة يوم 15 جانفي خلال ساعات التشميس

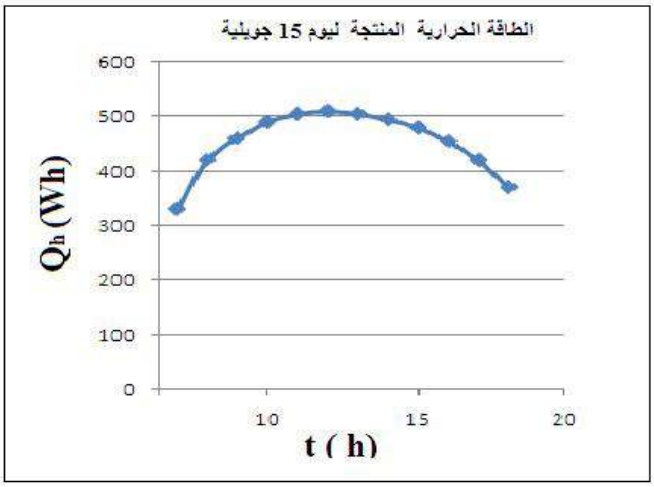
يوم 15 جانفي	
الزمن (h)	Qh (Wh)
8	0
9	0
10	167
11	167
12	251
13	334
14	334
15	334
16	251
17	167
18	0



شكل (5-16) منحنى الطاقة الحرارية ليوم 15 جانفي

جدول (5-5) الطاقة الحرارية المتحة يوم 15 جويلية خلال ساعات التشميس

يوم 15 جويلية	
الزمن (h)	Qh (Wh)
7	330
8	420
9	460
10	490
11	505
12	510
13	505
14	495
15	480
16	455
17	420
18	370



شكل (5-17) منحنى الطاقة الحرارية ليوم 15 جويلية

من الشكل (5-16) يبيّن ان الطاقة الحرارية المستخرجة من النظام الكهروشمسي الهجين خلال يوم 15 جانفي و اليومية المنتجة بلغت حوالي 2.01 kWh . وتتركز أساسًا خلال الفترة الممتدة بين الساعة 11 h و 15 h، حيث يبلغ فرق درجات الحرارة بين الدخول والخروج قيمته العظمى، مما يعكس فعالية الاسترجاع الحراري للمجمع خلال فصل الشتاء

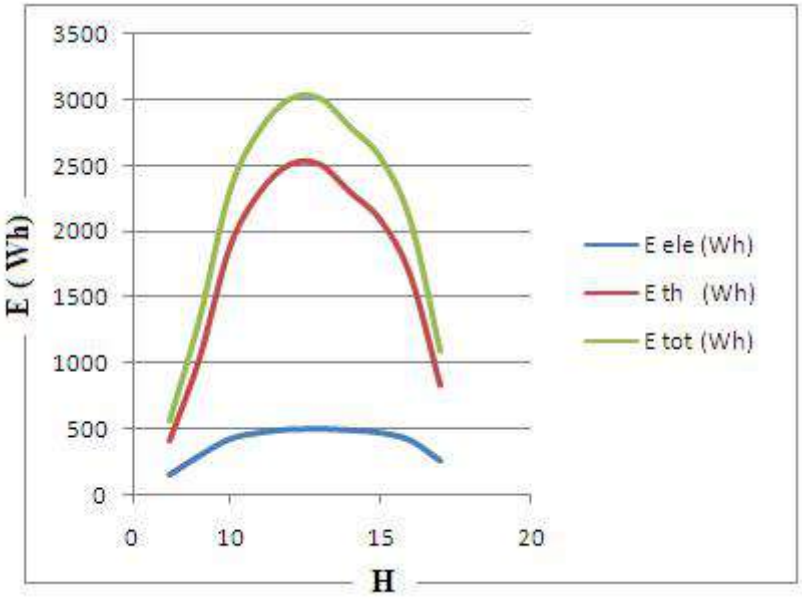
و من الشكل (5-16) تُظهر نتائج يوم 15 جويلية ارتفاعًا ملحوظًا في كل من الطاقة الكهربائية والحرارية المنتَجة مقارنة بيوم 15 جانفي، ويعود ذلك إلى زيادة الإشعاع الشمسي وارتفاع درجات حرارة التشغيل. حيث بلغت الطاقة الإجمالية اليومية للنظام الكهروشمسي الهجين قيمة قصوى عند منتصف النهار، مما يؤكد فعالية استخدام التركيز الشمسي في تحسين الأداء الطاقوي للنظام شتاءا وصيفا .

6. الحصيلة الطاقوية للنظام الهجين

- **الحصيلة الطاقوية المتحة من النظام الهجين من الطاقة الكهربائية و الطاقة الحرارية ليوم 15 جانفي كانت كالتالي :**

جدول (5-6) ا المحصلة الطاقوية ليوم 15 جانفي خلال ساعات التشميس

الساعة (H)	E ele (Wh)	E th (Wh)	E tot (Wh)
8	150	418	568
9	300	1045	1345
10	430	1881	2311
11	480	2299	2779
12	505	2508	3013
13	510	2508	3018
14	500	2299	2799
15	480	2090	2570
16	420	1672	2092
17	260	836	1096



الشكل (5-18) منحنى محصلة الطاقة ليوم 15 جانفي

ويصبح الطاقة الاجمالية اليومية **المنتجة من النظام** :

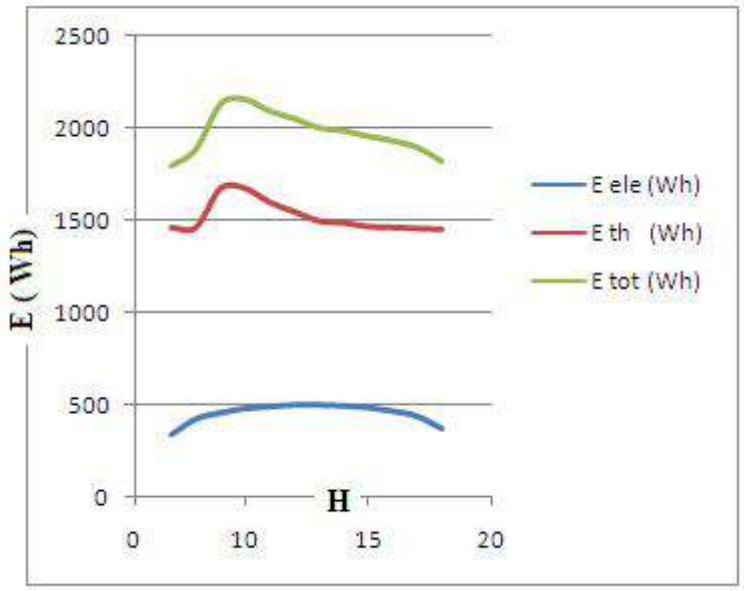
جدول (5-7) جدول المحصلة الاجمالية للطاقة ليوم 15 جانفي خلال ساعات التشميس

الطاقة	القيمة
مجموع الطاقة الكهربائية اليومية	**4.04 kWh**
مجموع الطاقة الحرارية اليومية	**17.56 kWh**
مجموع الطاقة الكلية اليومية	**21.6 kWh**

- **الحصيلة الطاقوية المتجة من النظام الهجين من الطاقة الكهربائية و الطاقة الحرارية ليوم 15 جويلية كانت كالتالي :**

جدول (5-8) ا المحصلة الطاقوية ليوم 15 جويلية خلال ساعات التشميس

الساعة (H)	E ele (Wh)	E th (Wh)	E tot (Wh)
7	7	335	1800
8	8	425	1890
9	9	460	2134
10	10	485	2159
11	11	495	2095
12	12	505	2055
13	13	505	2005
14	14	500	1990
15	15	490	1960
16	16	470	1935
17	17	440	1900
18	18	370	1825



الشكل (5-19) منحنى محصلة الطاقة ليوم 15 جويلية

ويصبح الطاقة الاجمالية اليومية المنتجة من النظام :

جدول (5-9) جدول المحصلة الاجمالية للطاقة ليوم 15 جانفي خلال ساعات التشميس

الطاقة	القيمة
مجموع الطاقة الكهربائية اليومية	5.480 kWh
مجموع الطاقة الحرارية اليومية	18.268 kWh
مجموع الطاقة الكلية اليومية	23.748 kWh

7. تخفيض درجة حرارة الخلايا الكهروشمسية في النظام الهجين

من خلال المنحنيات الموضحة في الشكلين (5-14) و (5-15) ، نلاحظ ارتفاعًا ملحوظًا في **درجة حرارة جدار الأنبوب الماص** الذي يحتوي على الخلايا الكهروشمسية، خصوصًا في يوم **15جويلية** الذي يتميز بدرجات حرارة مرتفعة. هذا الارتفاع يؤدي إلى **انخفاض المردود الكهربائي** بشكل واضح، وقد يتسبب في **تلف الخلايا الكهروضوئية** أو حتى **انهيار النظام الكهروشمي الهجين بالكامل** إذا لم تتم السيطرة الحرارية بشكل فعّال. ولذلك، يُعدّ من الضروري اعتماد **استراتيجيات فعّالة لتخفيض درجة حرارة الخلايا** ورفع مردود النظام.

ومن أهم هذه الاستراتيجيات ما يلي:

- **زيادة معدل تدفق المائع:(Mass Flow Rate)**

إن زيادة سرعة المائع المبرِّد ($\dot{m}$) تُسهم في سحب الحرارة المتولدة من الخلايا بسرعة أكبر، مما يؤدي إلى خفض درجة حرارتها والحفاظ على استقرار أدائها.

- **استخدام سوائل تبريد ذات حرارة نوعية عالية:(Cp)**

يُستخدم الماء عادةً كمائع أساسي للتبريد، غير أن هناك سوائل متقدمة تمتاز بموصلية حرارية مرتفعة وقدرة أكبر على امتصاص الحرارة، مما يحسّن أداء النظام بشكل ملحوظ.

- **تحسين تصميم مجمّع الحرارة:**

يمكن تحسين التصميم الهندسي للقنوات الداخلية في الأنبوب الماص بهدف زيادة مساحة التلامس بين المائع والخلايا الكهروضوئية، وتحسين تدفق المائع لضمان إزالة الحرارة بفعالية أكبر. ويُوصى باستخدام **قنوات دقيقة أو هياكل داخلية معقدة** لتحقيق توزيع حراري متجانس.

- **استخدام نظام تبريد خارجي فعّال:**

في حالة الأنظمة المغلقة، يمكن تحسين كفاءة **المبادل الحراري الخارجي**)مثل المبرد الجاف أو برج التبريد) لتخفيض درجة حرارة المائع قبل عودته إلى الألواح الشمسية.

- **استخدام خلايا كهروضوئية ملائمة لأنظمة التركيز العالي:**

مثل الخلايا **متعددة الوصلات(Multi-junction Cells)** ، التي تُصمَّم لتحويل أجزاء متعددة من الطيف الشمسي بكفاءة عالية، وتُظهر أداءً ممتازًا تحت الإشعاع المركز مقارنة بخلايا السيليكون التقليدية.

- جدول (5-10) **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°)
السيليكون أحادي البلورة	c-Si	0.35- إلى 0.45-	85 - 100 للمكونات	150 تدهور المواد، لحام
السيليكون متعدد البلورات	p-Si	0.38- إلى 0.48-	85 - 100 للمكونات	150 تدهور المواد، لحام
أرسينيد الغاليوم	GaAs (خلايا متعددة الوصلات)	0.05- إلى 0.15-	150 - 250 مصممة لـ CPV	300 - 400 < تعتمد على التصميم
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 <
الطبقات الرقيقة (أشكال أخرى مثل a-Si)	Thin-Film	0.15- إلى 0.25- (متغيرة حسب النوع)	80 - 90	120 - 150 (أكثر حساسية للحرارة)
الخلايا الشمسية البيروفسكايت	Perovskite	0.25- إلى 0.45- (متغيرة، لا يزال البحث جارياً)	60 - 85	100 - 120 > حساسة للرطوبة

من الجدول (5-10) **تعرض** مقارنة بين المواد المستخدمة في الخلايا الكهروضوئية وفق معاملاتها الحرارية المختلفة. ومن خلال تحليل المعطيات، يمكن اقتراح :

- **استعمال خلايا البيروفسكايت أو خلايا الغاليوم أرسينيد متعددة الوصلات (GaAs)** نظرًا لقدرتها العالية على تحمّل درجات الحرارة المرتفعة وكفاءتها الممتازة في ظروف التركيز.
- **تعزيز الأداء الحراري بإضافة** طبقات واقية وممتصّة للحرارة **ذات مقاومة عالية للتدهور الحراري**
- **د**مج نظام التبريد بالمبردات الكهروحرارية **المعروفة باسم** مبردات بلتير Peltier) (Thermoelectric Coolers، **والتي أثبتت فعاليتها في التحكم الدقيق بدرجة حرارة الخلايا الكهروضوئية.**

8. تحسين المردود الكهربائي

يعد تحسين المردود الكهربائي للنظام الهجين (**CPVT**)من أهم الأهداف في تصميم الأنظمة الكهروشمسية الحديثة، إذ يُسهم في رفع كفاءة التحويل الكلي للطاقة الشمسيةويكون :

- تعديل معدل تدفق المائع (m)واختيار نوع المائع المستخدم

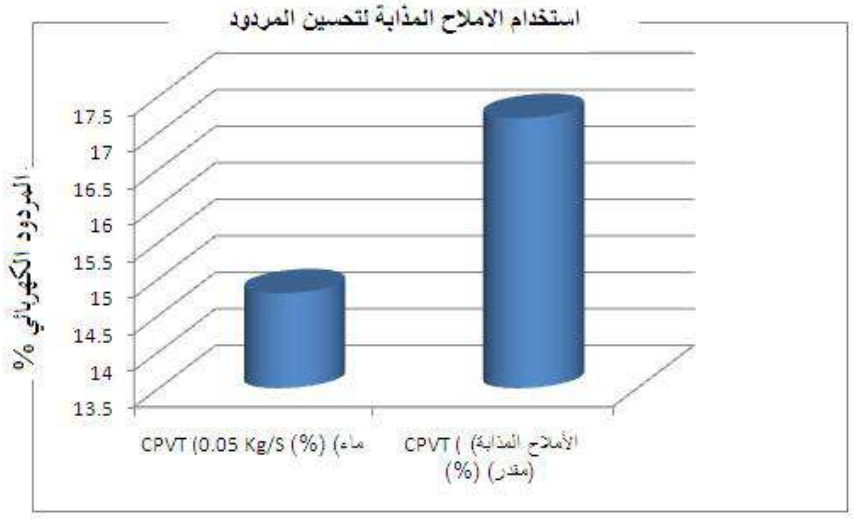
وهو من أبرز العوامل التي تؤثر مباشرة على الأداء الحراري والكهربائي للنظام.

شكل (5-20) تأثير سرعة تدفق المائع **على مردود النظام** ليوم 15جانفي

شكل (5-21) تأثير سرعة تدفق المائع **على مردود النظام** ليوم 15جويلية

يُظهر الشكلان (5-20) **و** (5-21) تأثير **سرعة تدفق المائع** على مردود النظام ليومي **15جانفي** و **15جويلية**. فبزيادة معدل التدفق من **0.05كغ/ثانية** إلى **0.15كغ/ثانية**، يتحسن المردود الكهربائي بوضوح نتيجة الانخفاض الملحوظ في درجة حرارة الألواح الشمسية، بذلك يزداد تبادل الحرارة بين المائع والخلايا، مما يُعزّز الاستقرار الحراري والكهربي للنظام.

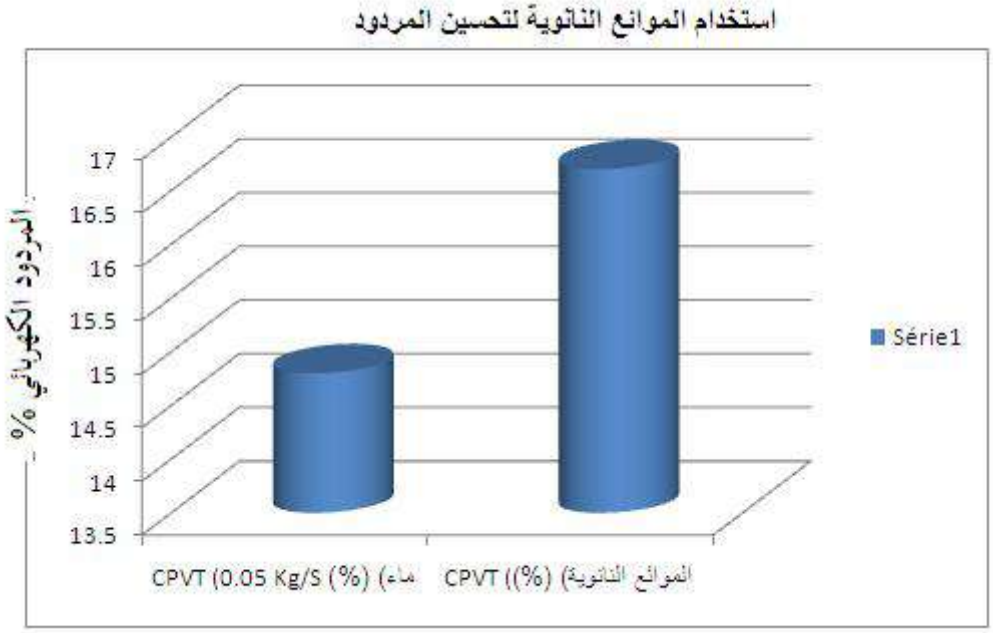
- **استخدام الأملاح المذابة**



شكل (5-16) تأثير استخدام الموائع الملحية على مردود النظام ليوم 15جويلية

كما يُبيّن الشكل **5–1** (تأثير **استخدام الموائع الملحية** في رفع مردود النظام ليوم **15جويلية**، حيث تُظهر النتائج أن الأملاح المذابة تمتاز بخواص حرارية عالية تمكّنها من تخزين ونقل الطاقة الحرارية بكفاءة أكبر مقارنة بالماء، ما يؤدي إلى تحسين الأداء العام للنظام.

- **استخدام الموائع النانوية**



الشكل(5-17) تأثير استخدام الموائع النانوبة على مردود النظام ليوم 15جويلية

الشكل (**17–5**)فيوضّح أثر **استخدام الموائع النانوية** على مردود النظام في يوم **15جويلية**.

فإضافة الجسيمات النانوية إلى المائع الأساسي تؤدي إلى زيادة الموصلية الحرارية وتحسين خصائص انتقال الحرارة، مما يرفع الكفاءة الكهروحرارية للنظام الهجين، ويجعل الأداء أكثر استقراراً تحت ظروف الإشعاع المكثف.

وبناءً على هذه النتائج، يمكن القول إن **اختيار المائع المناسب وتحديد معدل تدفقه الأمثل** يمثلان عنصرين أساسيين في تحقيق **أعلى مردود كهربائي ممكن** للنظام الكهروشمي–الحراري الهجين .(**PVCT**).

المراجع

[1] Zhao, X., Li, X., Wang, S., & Ma, T. (2017). Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal solar system with dual heat sinks. Applied Energy, 194, 269-282.

[2] Kalogirou, S. A. (2009). Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Academic Press.

[3] Chow, T. T., He, W., & Ji, J. (2010). Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application. Solar Energy, 80(3), 298-310.

[4] Bellos, E., &Tzivanidis, C. (2018). Multi-criteria evaluation of parabolic trough collector systems. Renewable Energy, 121, 622-632.

[5] Huang, J., Hu, P., Li, W., & Zheng, J. (2016)."Experimental study of a photovoltaic-thermal solar system. Energy Conversion and Management, 122, 305-313.

[6] Djamel Bechki and Smail Chihi، Kamal Eddine Aiadi ، Mohammed Elbar Soudani , Experimental and theoretical study of Parabolic trough collector (PTC) with a flat glass cover in the region of

algerian sahara (Ouargla), Journal of Mechanical Science and Technology 31 (8) (2017) 4003~4009

[7] Bellini, A., Bifaretti, S., Iacovone, V., Cornaro, C., 2009. Simplified model of a photovoltaic module. In: Applied Electronics. IEEE, pp. 47–51

[8] Sera, D., Teodorescu, R., Rodriguez, P., 2007. PV panel model based on datasheetvalues. In: Industrial Electronics. IEEE, pp. 2392–2396

[9] Vinod, Raj Kumar, S.K. Singh, Solar photovoltaic modeling and simulation: As a renewable energy

Solution, Energy Reports 4 (2018) 701–712

الخاتمة

هذه الدراسة كانت بهدف تحليل الأداء الكهروحراري للألواح الشمسية الهجينة و تحسين كفاءة التحويل الطاقوي في الأنظمة الكهروشمسية في مناخ الصحراء الجزائرية، من خلال النمذجة والمحاكاة العددية، .

في هذه الدراسة النظرية، تمّ إنجاز النمذجة والمحاكاة العددية للوح شمسي كهروضوئي وفق نظامين هجينين :الأول مدمج مع مركز شمسي (PVCT)، والثاني دون تركيز للإشعاع الشمسي .(PVT) وقد أُجريت مقارنة دقيقة بين النظامين خلال يومين نموذجيين يمثلان فصلي الشتاء والصيف، وهما 15 جانفي و 15جويلية، وتوصّلنا إلى النتائج الآتية:

- في يوم **15جويلية**، أنتج اللوح الشمسي وفق نظام (**PVCT**)استطاعة كهربائية تجاوزت **315واطًا** طوال فترة التشميس، مع قيمة عظمى بلغت **515واطًا**، في حين لم تتجاوز الاستطاعة القصوى في نظام (PVT)دون تركيز 110واطًا، أي بنسبة زيادة بلغت نحو 27 %
- في يوم **15جانفي**، بلغت الاستطاعة العظمى للوح الشمسي في نظام (**PVCT**)نحو **515واطًا**، بينما لم تتجاوز في نظام 87 (PVT)واطًا، أي بنسبة زيادة تقدّر بـ 20 %
- في يوم **15جويلية**، بدأ **المردود الكهربائي** في نظام (**PVCT**)عند **16%**، ثم تراجع تدريجيًا ليصل إلى **8%**عند الزوال، قبل أن يرتفع مجددًا بعد ذلك. أما في نظام (**PVT**)، فقد استقر المردود عند **20 %** طوال مدة التشميس. ويُعزى هذا التراجع في المردود ضمن النظام المركّز إلى **ارتفاع درجة حرارة الخلايا الشمسية** أثناء تركيز الإشعاع، خاصة عند منتصف النهار.

- في يوم 15جانفي، بدأ المردود الكهربائي في نظام (PVCT)عند 21 %، ثم انخفض إلى 12 % عند الزوال، ليرتفع مجددًا بعده، بينما ظلّ المردود في نظام (PVT)مستقرًا عند حوالي 18%خلال فترة التشميس .ويعود هذا الانخفاض كذلك إلى الارتفاع الحراري الناتج عن تركيز الإشعاع الشمسي في منتصف النهار.

تُظهر هذه النتائج أن استخدام أنظمة التركيز الشمسي يجب أن يكون مقرونًا بنظام هجين كهروضوئي—حراري، بحيث يتم امتصاص الحرارة الزائدة الناتجة عن التركيز من جهة، واستغلال المائع الساخن الناتج في تطبيقات حرارية مختلفة من جهة أخرى، خاصة خلال فصل الشتاء

وقد أبرز هذا العمل الدور المحوري الذي يمكن أن تؤديه الأنظمة الكهروشمسية الحرارية الهجينة (PVCT) في إنتاج الطاقة الكهربائية والحرارية مستقبلًا .كما تُعدّ هذه الدراسة تقييمًا شاملًا لإمكانيات وتحديات استغلال هذه الأنظمة وتطويرها، سواء عبر النمذجة النظرية أو المحاكاة الرقمية أو المعطيات التجريبية. وخلصت إلى أن االعتماد أنظمة التركيز الكهروشمسية الهجينة يمثل خيارًا واعدًا لتطوير حلول طاقوية مستدامة، خصوصًا في المناطق ذات الإشعاع العالي مثل منطقة ورقلة و جنوب الجزائري. حيث أصبحت اليوم تمثل حلًا واعدًا يجمع بين الإنتاجية العالية للطاقة الكهربائية والاستغلال الحراري الأمثل للطاقة الشمسية، مما يفتح آفاقًا جديدة نحو تحقيق كفاءة أعلى في تحويل الطاقة الشمسية وتطوير أنظمة مستدامة وفعالة في المستقبل. ومستقبلا يمكن تطوير النماذج الحرارية باستخدام الموائع النانوية ذات الموصلية العالية لتحسين انتقال الحرارة.و تصنيع خلايا كهروشمية بمواد تعمل بكفاءة عالية في درجات الحرارة المرتفعة لتصبح الانظمة الكهروشمية الهجينة من أحسن الأنظمة في استغلال الطاقة الشمية من خلالها يمكن تقليص مساحات نشر الالواح و دمج معها أنظمة جديدة للتجفيف أو لإنتاج الهيدروجين الاخضر او تقطير الماء او تكيف الدافئات الزراعية .

الملخص

الملخص

يحتل التحويل الكهروضوئي للطاقة الشمسية بواسطة الألواح الشمسية مكانة مهمة كطاقة نظيفة ومتجددة ومنتشرة على نطاق واسع يمكنها تلبية الاحتياجات المنزلية والصناعية من حيث الطلب على الكهرباء، إلا أن كفاءة هذا التحويل قليل منخفضة نسبيًا .لذلك،في هذه الدراسة النظرية،قمنا ببناء نموذج لمركز شمسي أحادي مكافئ مثبت على أنبوب الامتصاص بلوحة شمسية 105*54سم تتلقى إشعاعًا شمسيًا مركّزًا، لزيادة النعة الكهربائية للوحة من جهة، وتجنب ارتفاع درجة حرارة اللوحة بشكل مفرط بسبب تركيز الإشعاع الشمسي عن طريق تبريد السائل في أنبوب الامتصاص وإنتاج سائل ساخن من جهة أخرى وفقًا لنظام هجين كهروضوئي حراري بتركيز الإشعاع الشمسي .(PVCT) وأظهرت النتائج أنه في 15 يوليو أنتجت اللوحة الشمسية للنظام (PVCT)قدرة تتجاوز 315 واط طوال مدة التعرض للشمس وبلغت قيمتها القصوى 515 واط، أما في 15 يناير أنتجت اللوحة الشمسيةقدرة 515 واط، بالإضافة إلى إنتاج سائل ساخن يمكن استغلاله في عدة استخدامات منزلية وصناعية تحت درجة حرارة تصل إلى 60 درجة مئوية.

الكلمات المفتاحية: مركز شمسي، مركز كهروضوئي هجين، ألواح شمسية، طاقة شمسية حرارية

Abstract

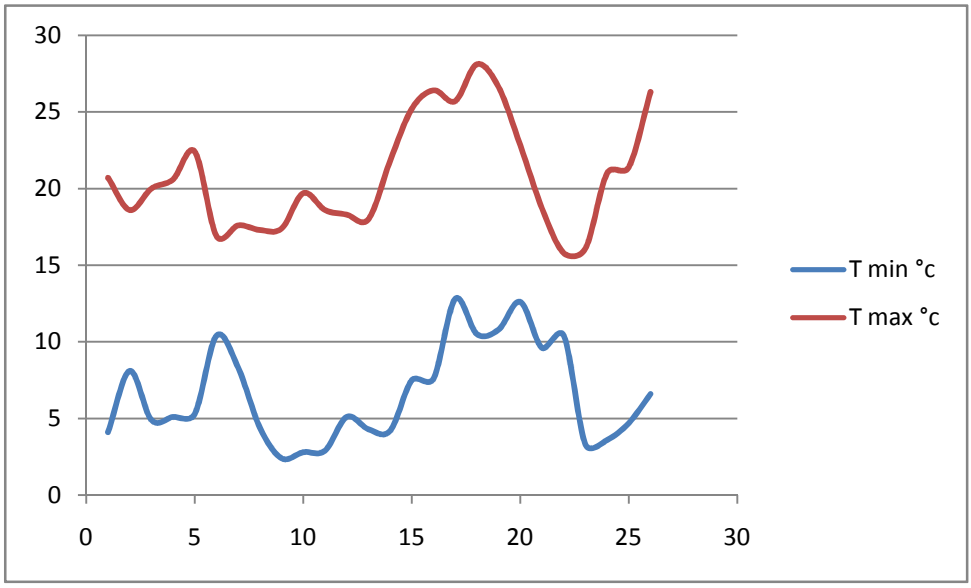
Photovoltaic conversion of solar energy by solar panels occupies an important place as a clean, renewable and widespread energy that can meet domestic and industrial needs in terms of electricity demand, but the efficiency of this conversion remains relatively low. Therefore, in this theoretical study, we constructed a model of a parabolic cylindrical solar concentrator which is fixed on the absorber tube with a 105*54 cm solar panel that receives concentrated solar radiation, to increase the electrical capacity of the panel on the one hand, and to avoid excessive temperature rise of the panel due to the concentration of solar radiation by the flow of the fluid in the absorber tube and the production of hot fluid on the other hand according to a hybrid photovoltaic-thermal system with solar radiation concentration (PVCT). The results showed that on July 15, the solar panel produced by the system (PVCT) a capacity exceeding 315 W over the entire duration of insolation and its maximum value reached 515 W, while on January 15, the solar panel produced a capacity of 515 W, in addition to the production of hot fluid that can be exploited in several domestic and industrial uses under a temperature reaching 60° C

Keywords: **solar concentrator, hybrid photovoltaic concentrator, solar panels, solar thermal**

الملاحق

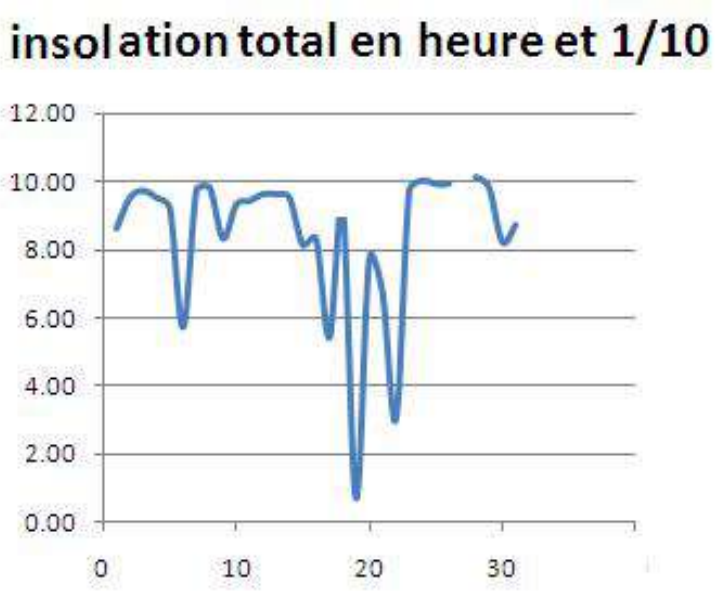
جدول تغير درجات الحرارة لشهر جانفي بمنطقة ورقلة

mois	jour	T min °c	T max °c
1	1	4.10	20.70
1	2	8.10	18.60
1	3	4.90	20.00
1	4	5.10	20.60
1	5	5.30	22.40
1	6	10.40	16.90
1	7	8.30	17.60
1	8	4.40	17.30
1	9	2.40	17.40
1	10	2.80	19.70
1	11	2.90	18.60
1	12	5.10	18.30
1	13	4.30	18.00
1	14	4.20	21.80
1	15	7.50	25.20
1	16	7.60	26.40
1	17	12.80	25.70
1	18	10.50	28.10
1	19	10.80	26.60
1	20	12.60	22.80
1	21	9.60	18.70
1	22	10.40	15.80
1	23	3.30	16.10
1	24	3.60	21.00
1	25	4.70	21.40
1	26	6.60	26.30
1	27	5.90	27.10
1	28	6.60	24.80
1	29	6.60	19.50
1	30	6.50	20.30
1	31	6.90	18.90



جدول تغيرات التشميس الكلي بمنطقة ورقلة
لشهر جانفي

jour	insolation total en heure et 1/10
1	8.60
2	9.50
3	9.70
4	9.50
5	9.20
6	5.70
7	9.70
8	9.80
9	8.30
10	9.30
11	9.40
12	9.60
13	9.60
14	9.50
15	8.10
16	8.30
17	5.40
18	9.20
19	0.70
20	7.70
21	6.70
22	3.00
23	9.70
24	10.00
25	9.90
26	9.90
27	
28	10.10
29	9.80
30	8.20

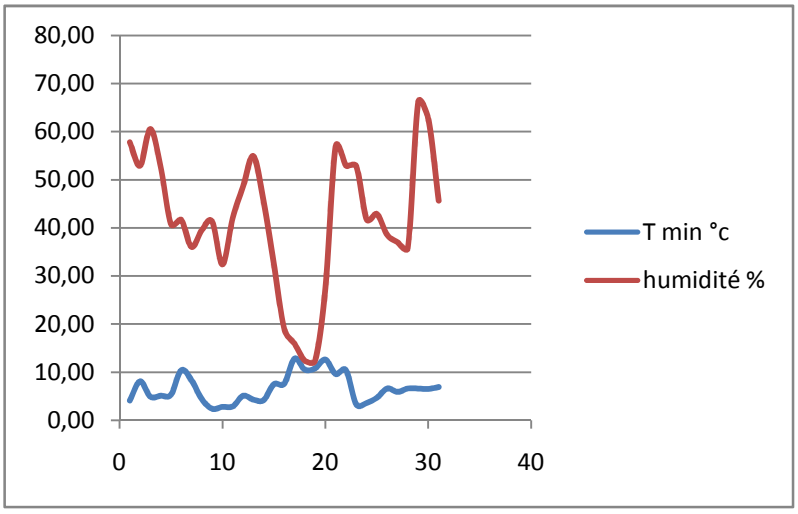


جدول تغير سرعة الرياح بمطقة ورقلة
لشهر جانفي

jour	vitesse moyen en m/s
1	1.50
2	3.25
3	1.13
4	2.25
5	4.00
6	4.50
7	3.25
8	2.13
9	1.13
10	2.75
11	2.00
12	2.50
13	1.50
14	3.25
15	2.88
16	2.75
17	3.63
18	3.88
19	2.88
20	3.13
21	3.50
22	3.38
23	1.75
24	2.13
25	1.63
26	1.50
27	2.00
28	1.75
29	3.38
30	3.13
31	2.88

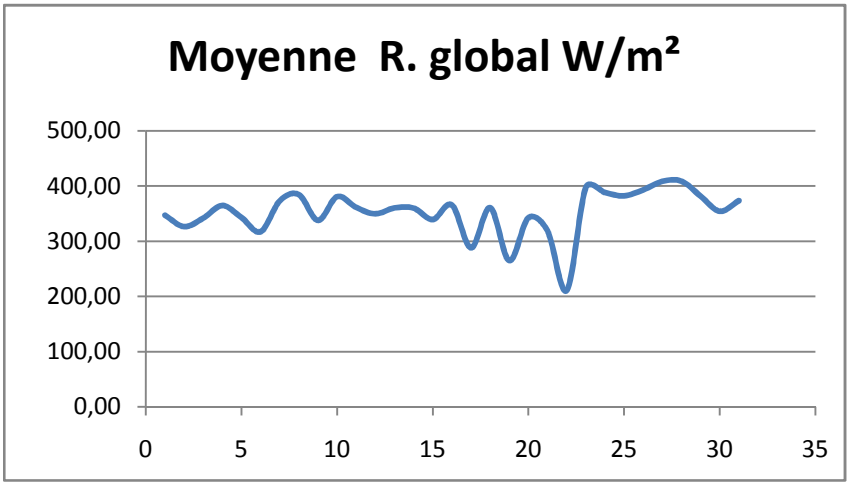
جدول تغيرنسبة الرطوبة بمنطقة ورقلة
لشهر جانفي

jour	T min °c	humidité %
1	4.10	57.75
2	8.10	52.88
3	4.90	60.50
4	5.10	52.63
5	5.30	40.75
6	10.40	41.63
7	8.30	36.00
8	4.40	39.50
9	2.40	41.25
10	2.80	32.38
11	2.90	42.00
12	5.10	48.50
13	4.30	54.88
14	4.20	45.50
15	7.50	32.50
16	7.60	19.00
17	12.80	15.88
18	10.50	12.38
19	10.80	12.38
20	12.60	27.38
21	9.60	56.88
22	10.40	52.88
23	3.30	52.75
24	3.60	41.75
25	4.70	42.88
26	6.60	38.50
27	5.90	37.00
28	6.60	35.75
29	6.60	66.00
30	6.50	62.50
31	6.90	45.63



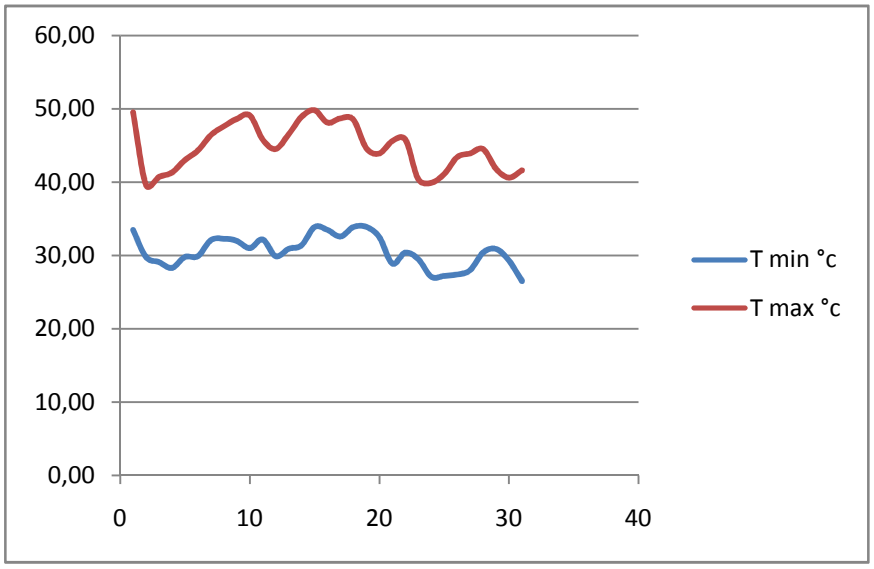
متوسط الإشعاع الشمسي بمطلة ورقلة
لشهر جانفي

jour	Moyenne R. global W/m²
1	347.07
2	326.52
3	341.82
4	364.72
5	342.94
6	317.21
7	373.18
8	384.46
9	337.80
10	380.86
11	361.07
12	349.68
13	360.39
14	360.05
15	339.44
16	365.63
17	288.01
18	360.72
19	264.87
20	342.70
21	318.51
22	210.89
23	397.44
24	388.05
25	382.26
26	393.13
27	408.50
28	408.87
29	381.66
30	354.37
31	373.47



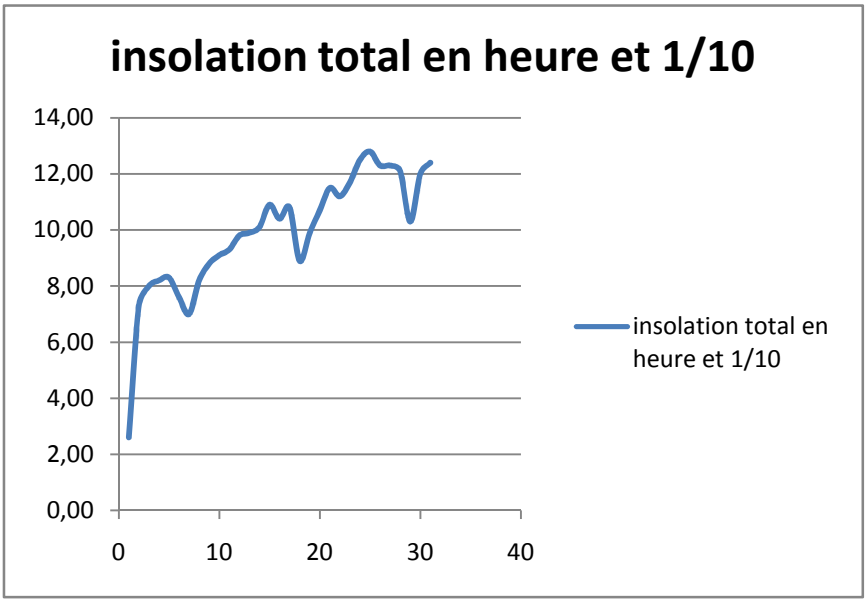
جدول تغير درجات الحرارة لشهر جويلية بمنطقة ورقلة

jour	T min °c	T max °c
1	33.50	49.50
2	29.80	39.60
3	29.10	40.70
4	28.30	41.30
5	29.80	43.00
6	29.90	44.30
7	32.10	46.40
8	32.30	47.60
9	32.00	48.60
10	31.00	49.10
11	32.20	45.80
12	29.90	44.50
13	30.90	46.50
14	31.40	48.90
15	33.90	49.80
16	33.50	48.10
17	32.60	48.70
18	33.90	48.50
19	33.90	44.60
20	32.50	43.90
21	28.90	45.60
22	30.40	45.80
23	29.50	40.40
24	27.10	39.90
25	27.20	41.10
26	27.40	43.40
27	28.00	43.90
28	30.40	44.50
29	30.90	41.80
30	29.30	40.60
31	26.50	41.60



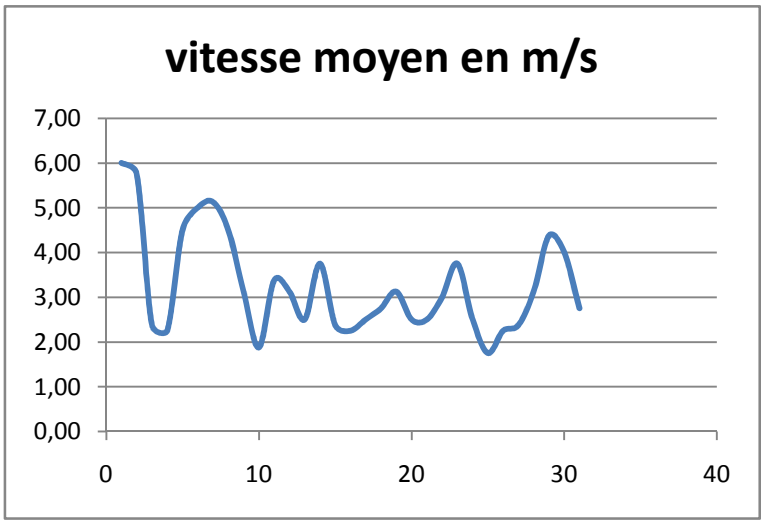
جدول تغيرات التشميس الكلي بمنطقة ورقلة
لشهر جويلية

jour	insolation total en heure et 1/10
1	2.60
2	7.30
3	8.00
4	8.20
5	8.30
6	7.60
7	7.00
8	8.20
9	8.80
10	9.10
11	9.30
12	9.80
13	9.90
14	10.10
15	10.90
16	10.40
17	10.80
18	8.90
19	9.90
20	10.70
21	11.50
22	11.20
23	11.70
24	12.50
25	12.80
26	12.30
27	12.30
28	12.10
29	10.30
30	12.00
31	12.40



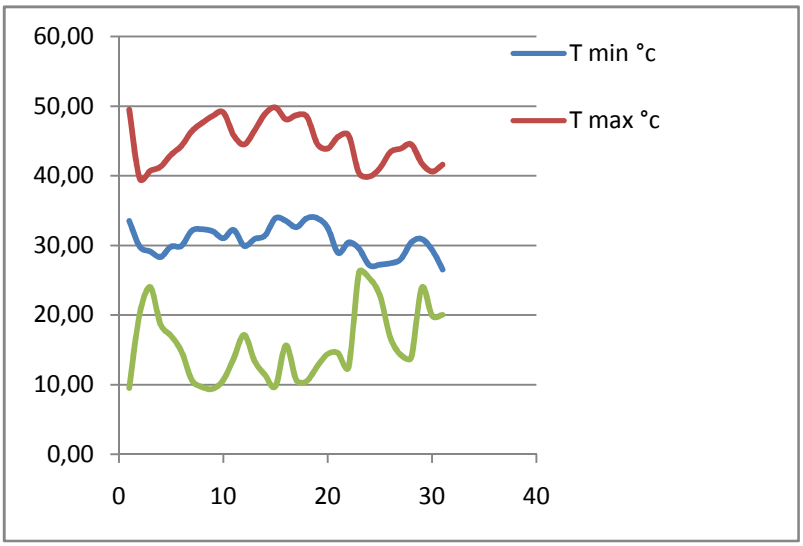
جدول تغير سرعة الرياح بمنطقة ورقلة
لشهر جويلية

jour	vitesse moyen en m/s
1	6.00
2	5.75
4	2.25
5	4.50
6	5.00
7	5.13
8	4.50
9	3.13
10	1.88
11	3.38
12	3.13
13	2.50
14	3.75
15	2.38
16	2.25
17	2.50
18	2.75
19	3.13
20	2.50
21	2.50
22	3.00
23	3.75
24	2.50
25	1.75
26	2.25
27	2.38
28	3.13
29	4.38
30	4.00
31	2.75



جدول تغيرنسبة الرطوبة بمطقة ورقلة
لشهر جويلية

jour	T min °c	T max °c	humidité %
1	33.50	49.50	9.50
2	29.80	39.60	20.13
3	29.10	40.70	24.00
4	28.30	41.30	18.63
5	29.80	43.00	17.00
6	29.90	44.30	14.75
7	32.10	46.40	10.63
8	32.30	47.60	9.63
9	32.00	48.60	9.38
10	31.00	49.10	10.63
11	32.20	45.80	13.75
12	29.90	44.50	17.13
13	30.90	46.50	13.38
14	31.40	48.90	11.38
15	33.90	49.80	9.75
16	33.50	48.10	15.63
17	32.60	48.70	10.63
18	33.90	48.50	10.50
19	33.90	44.60	12.63
20	32.50	43.90	14.38
21	28.90	45.60	14.50
22	30.40	45.80	12.50
23	29.50	40.40	26.13
24	27.10	39.90	25.25
25	27.20	41.10	22.75
26	27.40	43.40	16.75
27	28.00	43.90	14.25
28	30.40	44.50	13.88
29	30.90	41.80	23.88
30	29.30	40.60	19.88
31	26.50	41.60	20.00



متوسط الإشعاع الشمسي بمطلة ورقلة
لشهر جويلية

jour	Moyenne R. global W/m²
1	455.65
2	550.30
3	564.66
4	567.61
5	557.83
6	541.95
7	516.82
8	552.50
9	562.06
10	549.51
11	556.93
12	559.49
13	561.16
14	549.03
15	561.95
16	538.06
17	555.16
18	503.19
19	524.63
20	543.29
21	564.43
22	562.65
23	583.66
24	591.76
25	591.32
26	581.10
27	581.56
28	570.90
29	556.29
30	576.74
31	588.88