

## رؤى جديدة لأمنلة المنظومة الكهروضوئية (دراسة مرجعية)

### الملخص:

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو استعراض أهم الطرق لتحسين فعالية الألواح الكهروضوئية وزيادة عمرها الافتراضي. يتم عرض طرق زيادة الإشعاع الشمسي الساقط على الألواح الكهروضوئية، بالإضافة إلى طرق التبريد وطرق تتبع نقطة الاستطاعة القصوى. يكشف تحليل الإيجابيات والسلبيات أن طرق تحسين الاستطاعة المولدة من الألواح الكهروضوئية تعتمد بشكل كبير على الموقع الجغرافي والظروف المناخية والمواد المستخدمة. تعتبر هذه المقالة ذات أهمية للمهندسين الذين يحاولون تحديد الحلول الأكثر ملائمة لزيادة إنتاج الطاقة للمنظومات الكهروضوئية.

### 1- المقدمة:

لقد زاد الطلب على الكهرباء بشكل كبير في السنوات الأخيرة بسبب النمو الاقتصادي والسكاني في البلدان النامية، والارتفاع التدريجي في مستويات الراحة في البلدان المتقدمة، والطلب على المزيد من السلع والخدمات، وزيادة عدد السيارات ووسائل النقل الكهربائية [1]. تؤدي الزيادة في الطلب على الكهرباء إلى ارتفاع مستويات التلوث، ويمكن منع ذلك إذا تم إنتاج الكهرباء باستخدام الطاقة المتجددة.

تعتبر الأنظمة الكهروضوئية التي تحول الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية من أهم أنظمة الطاقة المتجددة وبسبب الطلب المتزايد على الطاقة الكهربائية وعدم مقدرة الشبكة العامة تأمين هذا الطلب لذلك يجب زيادة كمية الطاقة الكهربائية المولدة من الألواح الكهروضوئية وذلك بتحسين فعاليتها. علاوة على ذلك، إذا تمت زيادة عمر الطاقة الكهروضوئية أيضاً، فإن إجمالي كمية الكهرباء المولدة ستزداد بشكل أكبر.

تتراوح كفاءة أهم الألواح الكهروضوئية من 10% إلى 38%. يتم عرض المقارنة بين الخلايا الكهروضوئية الأكثر كفاءة والألواح الكهروضوئية في الجدول 1. كفاءة الألواح الكهروضوئية أصغر من الخلايا الكهروضوئية المستخدمة في بنائها. في حالة Si، يكون الفرق صغيراً جداً، بينما في حالة Perovskite، يكون الفرق مرتفعاً، ويفسر ذلك حقيقة أن التكنولوجيا لا تزال حديثة. تعد خلية Perovskite مرشحاً واعداً لكفاءة جيدة. وبالتالي، فإن إحدى الطرق لزيادة الكفاءة هي العثور على مواد جديدة مناسبة لصنع خلايا كهروضوئية أفضل.

من أجل ضمان كمية الطاقة اللازمة، يجب زيادة الاستطاعة القصوى ( $P_{max}$ ) التي تولدها الألواح الكهروضوئية. يمكن تحقيق ذلك من خلال عملية الإنتاج التي تنفذ نتائج البحث ومن خلال الطرق الخارجية التي هي موضوع هذه المقالة لأن مستخدمي الألواح يمكنهم إجراء تحسينات. بالنسبة لمسألة النوع الأول، مثال على ذلك هو زيادة المساحة الفعالة للخلايا الكهروضوئية. تحتوي الخلايا الكهروضوئية من الجيل الثالث من Maxeon على أصابع وقضبان ناقلة، تم نقلها من الوجه الأمامي إلى الوجه الخلفي؛ وبالتالي، تكون كافة الاتصالات في الجزء الخلفي من الخلية. وبالتالي، فإن المنطقة الأمامية بأكملها فعالة. الطاقة المولدة من نظام Maxeon الكهروضوئي أعلى بنسبة تزيد عن 30% من الأنظمة الكهروضوئية الأخرى لنفس المنطقة [2].

### الجدول 1: كفاءة الخلايا والألواح الكهروضوئية

المادة	mSi	a-Si/nc-Si	GaAs	CIGS	Perovskite	CdTe	InGaP/GaAs/InGaAs
الخلية الكهروضوئية	26.7	12.7	29.1	22.9	20.9	21	37.9
اللووح الكهروضوئي	24.4	12.3	25.1	19.2	11.6	18.6	31.2

في هذه الدراسة، من المهم تحديد ووصف ومناقشة إيجابيات وسلبيات الطرق ونتائجهم لتحسين أداء الألواح الكهروضوئية الموجودة في بيئة العمل. تم تحديد بارامترات الألواح الكهروضوئية، ومن المهم إضافة شيء ما للحصول على الاستطاعة القصوى المحددة من قبل المصنع أو لتجاوز تلك القيمة.

تزداد الاستطاعة القصوى المولدة من الألواح الكهروضوئية مع زيادة الإشعاع الشمسي الذي يسقط عليهم. يمكن حل هذه المشكلة باستخدام أنظمة تعقب (تتبع) الشمس، والتي تعكس الإشعاع الشمسي على الألواح الكهروضوئية وأنظمة تركيز الطاقة الشمسية. كل هذه الحلول تسبب مشاكل أخرى يجب حلها للحصول على تحسينات ملموسة. واحدة من أهم المشاكل هي أن درجة حرارة الألواح الكهروضوئية تزداد مع زيادة الإشعاع، تتناقص الاستطاعة القصوى

المولدة من خلية السيليكون أحادية البلورية بحوالي (0.45% لكل درجة حرارة)  $0.45\%/^{\circ}\text{C}$  [3]، وأيضًا ينخفض العمر الافتراضي [4]. تُستخدم طرق التبريد، السلبية منها والفعالة، لتقليل درجة حرارة الخلية الكهروضوئية. إن وجود درجة حرارة موحدة على سطح اللوح الكهروضوئي مهم جداً لكي تعمل الطاقة الكهروضوئية بشكل صحيح، ويجب أن تضمن طرق التبريد ذلك. وهناك مشكلة أخرى تنشأ وهي ما إذا كانت طريقة التبريد مستدامة من المنظور الاقتصادي. هل الطاقة الإضافية الناتجة عن نظام التبريد المستخدم تغطي تكلفتها الإضافية؟ ومن المهم أن يؤخذ في الاعتبار العمر الإضافي للألواح الكهروضوئية، الذي يضمنه نظام التبريد، من الناحية الاقتصادية أيضاً. ولذلك، فإن نظام التبريد ضروري للغاية للخلايا الكهروضوئية في منظومات تركيز الضوء. من المهم أيضاً استخدام كل الاستطاعة التي يمكن توليدها بواسطة الألواح الكهروضوئية لتحسين أداء النظام، وبالتالي، يصبح استخدام تتبع نقطة الاستطاعة القصوى (MPPT) Maximum Power Point Tacking أمراً ضرورياً.

العوامل الأخرى التي يمكن أن يكون لها عواقب سلبية على طاقة خرج اللوح الكهروضوئي هو الغبار والظل والرطوبة وسرعة الرياح واتجاهها وزاوية الميل [5].

يتضمن هذا البحث خمسة أقسام، على النحو التالي: في القسم 2 يتم عرض طرق زيادة الإشعاع الشمسي الذي يسقط على الألواح الكهروضوئية. وفي القسم 3، تتم مناقشة طرق زيادة الاستطاعة المولدة من الألواح الكهروضوئية باستخدام التبريد. يقدم القسم 4 وبطريقة موجزة طرق تتبع نقطة الاستطاعة القصوى. أما القسم الأخير فهو مخصص للمناقشات والاستنتاجات.

## 2. طرق زيادة الإشعاع الشمسي الساقط على الألواح الكهروضوئية

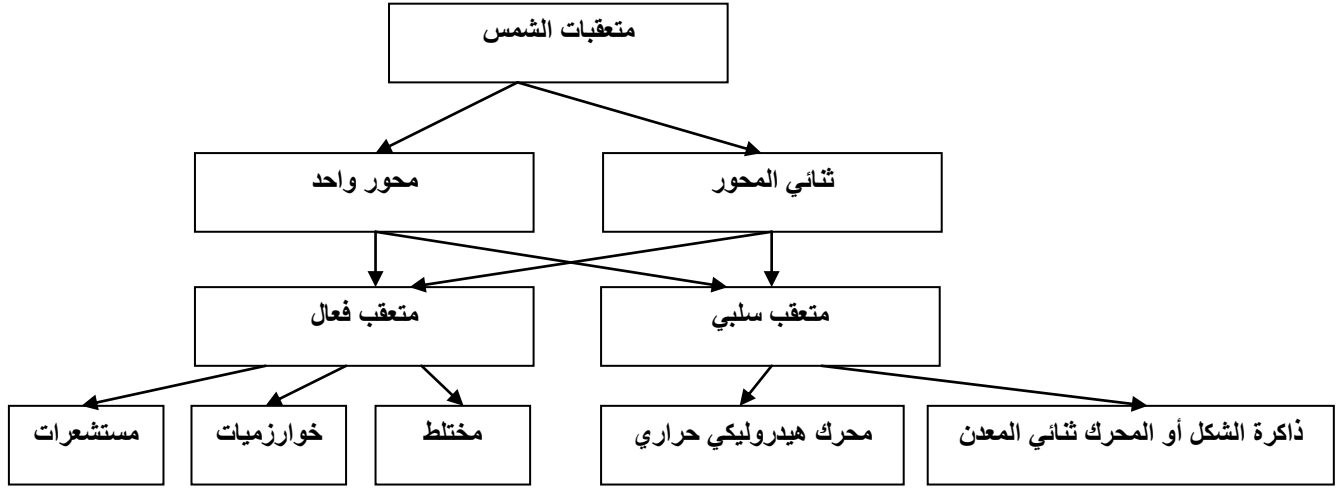
### 2.1 أنظمة تعقب الشمس

من الناحية النظرية، يزداد الإشعاع الشمسي الساقط على الألواح الكهروضوئية بنسبة 41% عند استخدام متتبع الشمس ثنائي المحاور [6]، لكن الزيادة في الطاقة المولدة تتراوح بين 10% و45% مقارنة بالأنظمة الثابتة [7]. وتتراوح الطاقة التي يستهلكها النظام الكهروضوئي لتتبع الشمس عند استخدام نظام التتبع بين 2% و5% من الطاقة المولدة. تعد أنظمة تعقب الشمس أكثر تعقيداً من الأنظمة الثابتة، كما أن صيانتها أكثر تكلفة. يعد جهاز تعقب الشمس ضرورياً للغاية لأنظمة الإضاءة المركزة. يتم عرض الأنواع الرئيسية لأجهزة تتبع الشمس والربح في الاستطاعة مقارنة بالنظام الكهروضوئي الثابت في الجدول 2.

الجدول 2: أنواع متعقبات الشمس وربحهم.

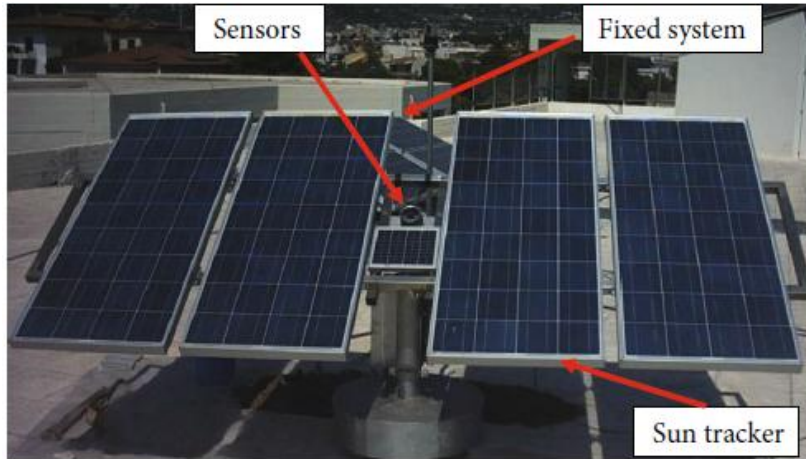
النوع	الوصف	ربح الاستطاعة
محور واحد	(1) يكون الدوران في اتجاه E-W، وفي N-S، يميل اللوح عند 30 درجة. إنه جهاز تعقب فعال، يعتمد على حلقة مغلقة (يتم استخدام اثنين من الديودات الضوئية).	15.3% - يوم غائم. 16.2% - يوم غائم جزئياً. 23.2% - يوم صافٍ
	(2) يكون الدوران في اتجاه N-S. إنه متتبع فعال يعتمد على الحلقة المغلقة (الخوارزمية). حركة النظام كهروميكانيكية.	20%
	(3) يكون الدوران في اتجاه E-W، وهو متتبع فعال باستخدام الخوارزميات. النظام الثابت قريب من الأرض للموقع A، وهو واحد من 90 جهازاً لتتبع الشمس ولكن تم إلغاء تفعيله للموقع B، ويميل بزاوية 30 درجة للموقع C.	الموقع A 37.7% الموقع B 30.4% الموقع C 31.5%
	(4) يكون الدوران في الاتجاه E-W، وهو جهاز تعقب فعال يعتمد على الحلقة المغلقة (أجهزة الاستشعار).	45%
	(5) يكون الدوران في اتجاه N-S، وهو جهاز تعقب سلبي يعتمد على شريطين ثنائي المعدن.	23%
	(6) جهاز تتبع بثلاثة مواضع (زوايا ثابتة) للصباح والظهرية والعصر.	24.5%
ثنائي المحور	(1) إنه متتبع فعال مزود بخوارزمية تتبع. حركة النظام كهروميكانيكية.	42.6%
	(2) متتبع الشمس الاستوائية. إنه جهاز تعقب فعال مزود بأجهزة استشعار.	108 Whr/m2 - يوم غائم 603 Whr/m2 - يوم صافٍ
	(3) إنه جهاز تعقب فعال يعتمد على MPPT.	37.1%
	(4) إنه متتبع فعال يعتمد على خوارزمية.	24.59%

يعتمد ربح الاستطاعة عند استخدام جهاز تعقب الشمس بشكل كبير على نوع أجهزة التتبع، وعلى الموقع [8]، وعلى الفصل، والشهر، واليوم [9]، وعلى تقنيات الألواح الكهروضوئية. التصنيف الأكثر شهرة لأجهزة تتبع الشمس هو تابع لعدد المحاور: مع محور واحد ومحور مزدوج (الشكل 1). على سبيل المثال، بالنسبة لمتتبع الشمس ثنائي المحور المعتمد على MPPT، يبلغ الربح 28.8% في الشتاء، و33.6% في الربيع، و43.6% في الصيف، و38.3% في الشتاء [10].



الشكل 1: تصنيف أجهزة تتبع الشمس.

يعتمد ربح الاستطاعة على تقنيات الألواح الكهروضوئية. الربح لأربعة أنواع من الخلايا الكهروضوئية عند استخدام محور مزدوج مع خوارزمية هو 17% لألواح السيليكون غير المتبلورة، و 18% لألواح السيليكون أحادية البلورية، و5% لألواح السيليكون متعددة البلورات، و20% لألواح CIS [11]. يعتمد ربح الاستطاعة أيضاً على فصول السنة وضمنياً على الشهر. النتائج التجريبية للربح الذي تم الحصول عليه باستخدام نظام فعال لتتبع الشمس ثنائي المحور، في باتراس، اليونان، هي 31.11% لشهر أبريل، و32.78% لشهر مايو، و36.85% لشهر يونيو، و34.2% لشهر يوليو (الشكل 2) [12].



الشكل 2: نظام فعال وثابت لتتبع الشمس ثنائي المحور، باتراس، اليونان.

## 2.2 الأنظمة العاكسة

يمكن زيادة الاستطاعة القصوى المولدة من الألواح الكهروضوئية إذا سقط الإشعاع الشمسي المنعكس على الألواح الكهروضوئية. ويمكن الحصول على ذلك في أوضاع الانعكاس السلبي والطبيعي والانعكاس الاصطناعي الفعال.

### 2.2.1 الانعكاس السلبي

ينعكس الإشعاع الشمسي بواسطة السطح. يوفر albedo معلومات حول كمية الإشعاع الشمسي التي تنعكس عن كل نوع من أنواع الأسطح. يتم عرض albedo لأنواع مختلفة من الأسطح في الجدول 3.

يعتمد الإشعاع الإضافي الذي يسقط على الألواح الكهروضوئية على  $albedo$ ، وعلى شكل السطح العاكس، وزاوية ميل الألواح الكهروضوئية.

هناك بعض الدراسات حول زيادة الاستطاعة القصوى المولدة من الألواح الكهروضوئية باستخدام الانعكاس السلبي. الألواح الكهروضوئية التي يتم تركيبها على سقف كبير مسطح أو أرض مسطحة كبيرة يمكن أن يتلقى إشعاعاً شمسياً إضافياً كبيراً عن طريق الانعكاس. يتم تغطية الأسطح عموماً بمواد مقاومة للماء ذات انعكاس بسيط، مثل الغشاء البيتوميني (BM) والألواح الإسمنتية (الجدول 3). في الوقت الحاضر، هناك مواد مقاومة للماء ذات انعكاس عالي، مثل البلاط الأبيض أو المواد البيضاء المقاومة للماء، والتي يكون  $albedo$  أعلى من 70%. كما يمكن أن يغطي السقف والأرض في الشتاء بالتلوج التي تصل نسبة بياضها  $albedo$  إلى 92%.

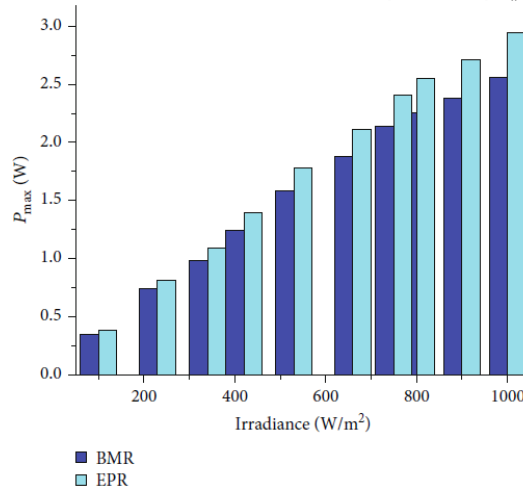
الجدول 3: قيم  $albedo$

السطح	Albedo (%)
التربة الجافة (الغامقة)	9
الغشاء البيتوميني	13
ألواح الأسمنت	15
عشب أخضر	23
أسمنت	25
الخرسانة (حليبي)	46
الثلج القديم	50-45
البلاط الأبيض	71
ورق ألومنيوم	75
خرسانة مطلية باللون الأبيض	80-60
البوليسترين الموسع	83
الثلج الحديث	92-90

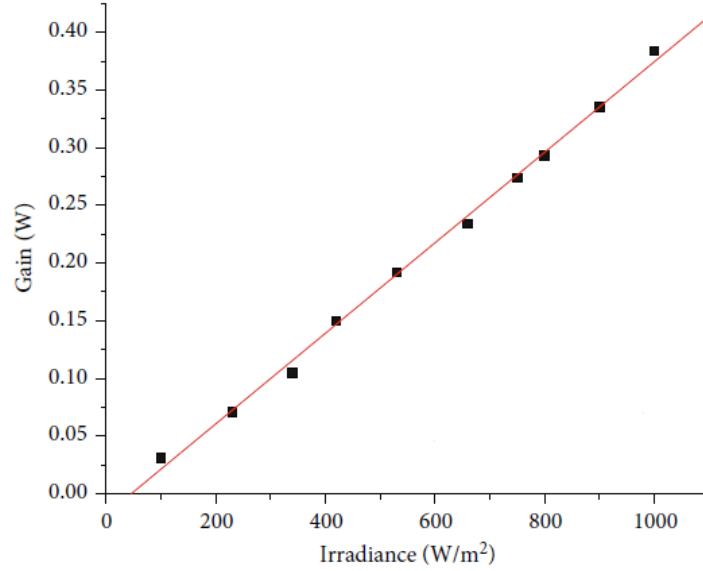
P.A. Cotfas و D.T. Cotfas اقترحا طريقة بسيطة لزيادة الاستطاعة المولدة من الألواح الكهروضوئية

[13].

تم استخدام البوليسترين الممدد لمحاكاة المادة البيضاء المقاومة للماء أو الثلج.  $albedo$  البوليسترين الممدد (EP) يزيد عن 80%. تم استخدام لوحين كهروضوئيتين "مزدوجتين" لدراسة تأثير الإشعاع الشمسي المنعكس، أحدهما يوضع على البوليسترين الممدد لاستقبال الإشعاع الشمسي المنعكس من EP والآخر لاستقبال الإشعاع الشمسي المنعكس من الغشاء البيتوميني [13]. يتم عرض مقارنة للاستطاعة القصوى المولدة من الألواح الكهروضوئية مع الإشعاع الشمسي المنعكس من الغشاء البيتوميني BMR ومن البوليسترين الممدد EPR في الشكل (3). تتم المقارنة لقيم الإشعاع الشمسي العالمية المختلفة من  $100W/m^2$  إلى  $1000W/m^2$ . يتراوح الربح كنسبة مئوية للاستطاعة القصوى للوح الكهروضوئي مع EPR من 8% عند إشعاع  $100W/m^2$  إلى 17% عند إشعاع  $1000W/m^2$ . الربح بالاستطاعة، كتابع للإشعاع، هو خطي (الشكل 4).



الشكل 3 P<sub>max</sub> المتولدة عن اللوحين الكهروضوئيين.



الشكل 4: ربح  $P_{max}$  للوح الكهروضوئي في حالة EPR

يلعب الانعكاس السلبي دورًا مهمًا جدًا في ربح الإشعاع للألواح الكهروضوئية ثنائية الجانب. تشير التقارير إلى أن الزيادة في استطاعة الألواح الكهروضوئية ثنائية الجانب مقارنة بالألواح الكهروضوئية أحادية الوجه تتراوح بين 13% و35% في الأيام المشمسة وبين 40% و70% في الأيام الملبدة بالغيوم، كما أن ارتفاع الألواح الكهروضوئية عن الأرض يؤثر على كمية الإشعاع الشمسي المنعكس الذي يقع بشكل رئيسي على الجزء الخلفي من الألواح وعلى مقدمتهم أيضًا.

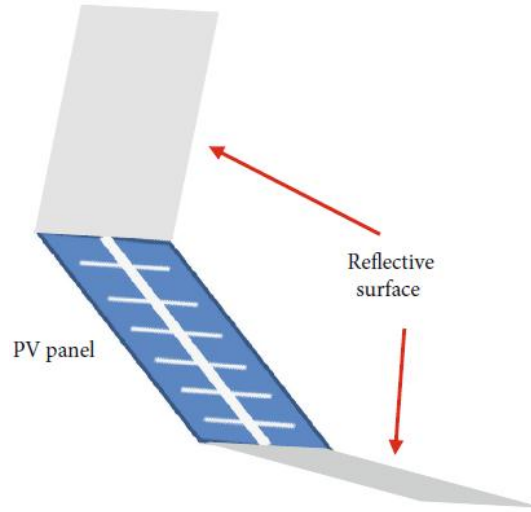
## 2.2.2 الانعكاس الفعال

يمكن زيادة الإشعاع الشمسي المنعكس الذي يسقط على الألواح الكهروضوئية بشكل مصطنع باستخدام طرق مختلفة. إحدى هذه الطرق هي استخدام المرايا (المرايا الزجاجية أو الألومنيوم المؤين)، لكن يمكن استخدام الأسطح العاكسة، مثل رقائق الألومنيوم أو بلاط الزنك، من أجل تقليل سعر المنظومة. نسبة التركيز لهذه الطرق منخفض جدًا، يصل إلى 3 مرات كحد أقصى.

يمكن أن تستخدم هذه الأنظمة من مرآة واحدة إلى أربع مرايا. الأنظمة الأكثر استخدامًا هي تلك التي تستخدم مرآتين، وتسمى أحواض -V (V-trough) [14].

بشكل عام يجب استخدام أنظمة V-trough مع أنظمة تعقب الشمس. يمكن استخدام الأنظمة التي تحتوي على مرآة واحدة أو مرآتين (الشكل 5) مع جهاز تعقب الشمس أو بدونه [15]. تعتبر زاوية ميل المرايا مهمة جدًا لتحقيق أقصى قدر من الربح. Kostić وآخرون حسبوا زاوية الميل المثلى للمرايا نحو اللوح الكهروضوئي. وكانت الزاوية المثلى تساوي 66 درجة [16].

قام Arshad وآخرون بقياس ربح الاستطاعة للنظام باستخدام المرايا بدون جهاز تعقب الشمس. تبلغ الاستطاعة المقاسة للوح السيليكون الكهروضوئي أحادي البلورة بدون مرايا 24.84 W. وقد حصلوا على 28.84 W للوحة ذات مرآة واحدة، و 31.25 W للنظام ذي مرآتين، و 36.93 W للنظام ذو ثلاث مرايا [17].



الشكل 5: اللوح الكهروضوئي مع نظام المرآة.

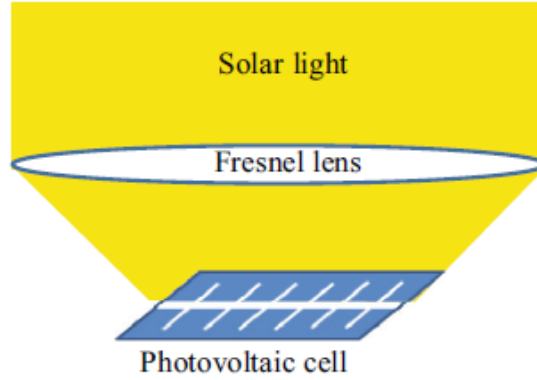
يتم عرض الربح في الاستطاعة عند استخدام أنظمة V-trough بإيجاز في الجدول 4.

الجدول 4: نظام V-trough

معدل التركيز	الربح (%)	الوصف
2	DST to F is 9.4 V to DST is 23.4 V to F is 32.8	Ya'acob وآخرون أجروا دراسة مقارنة باستخدام ثلاثة أنظمة كهروضوئية من السيليكون أحادي البلورة: الإصلاح (F)، ومتعقب الشمس ثنائي المحور (DST)، ونظام V-trough مع متتبع الشمس (V)؛ الاستطاعة المقدره لجميع الأنظمة الثلاثة هي 1 كيلو واط
-	70 to the panel without mirror	اقترح Hu و Yachi نظام V مبتكرًا مزودًا بأداة تعقب لكل مرآة.
1.81	M to SA is 34	قامت تينا وسكاندورا بمقارنة الطاقة المولدة من نظامين كهروضوئيين: أحدهما نظام تتبع أحادي المحور (السمت) (SA) والثاني نظام تتبع ثنائي المحور مع مرايا (M)
2	7.7 to the panels without mirrors	سولانكي وآخرون اقترحوا نظامًا يتكون من 6 ألواح سيليكون أحادية البلورة، كل واحدة منها موضوعة في نظام V
2	55 to the panels without mirrors and PCM	مايتي وآخرون درسوا لوحين كهروضوئيين باستطاعة 10 W موضوعين على حوض على شكل حرف V يتم تبريد أحد الألواح الكهروضوئية باستخدام مادة PCM، بينما لا يتم تبريد اللوح الثاني. يتم استخدام متتبع يدوي للشمس في اتجاه الشرق والغرب. تميل الألواح بزاوية 18.9 درجة إلى الأفق، وهي الزاوية المثالية
2.2	V to CPC is 17.2 at the specific tilt angle 30	سينغ وآخرون قارنوا الاستطاعة المولدة لنظامين: أحدهما هو نظام V-trough والآخر هو المكثف المكافئ المركب (CPC). يتم استخدام أربع من الخلايا الكهروضوئية أحادية البلورية متصلة بشكل تسلسلي لكل مكثف

### 2.3 المنظومات الانكسارية

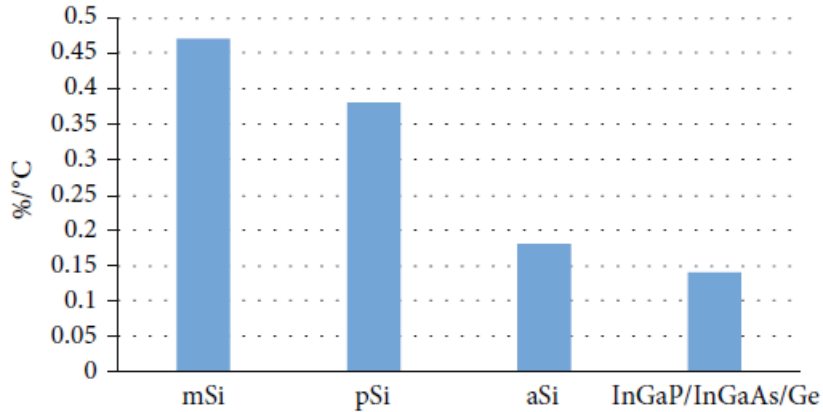
تعد عدسة فريزل هي الأسلوب الأفضل والأكثر استخداماً لتركيز الضوء المنكسر (الشكل 6). يمكن أن يختلف معدل التركيز من تركيز منخفض يصل إلى 10 شمس إلى تركيز عالي يصل إلى 2000 شمس [18]. تُستخدم عدسة فريزل المصنوعة من البولي كربونات على نطاق واسع نظراً لتكلفتها المنخفضة ومطابقتها الأكبر مقارنةً بالعدسات المصنوعة من مواد أخرى.



الشكل 6: نظام تركيز ضوء فريزل.

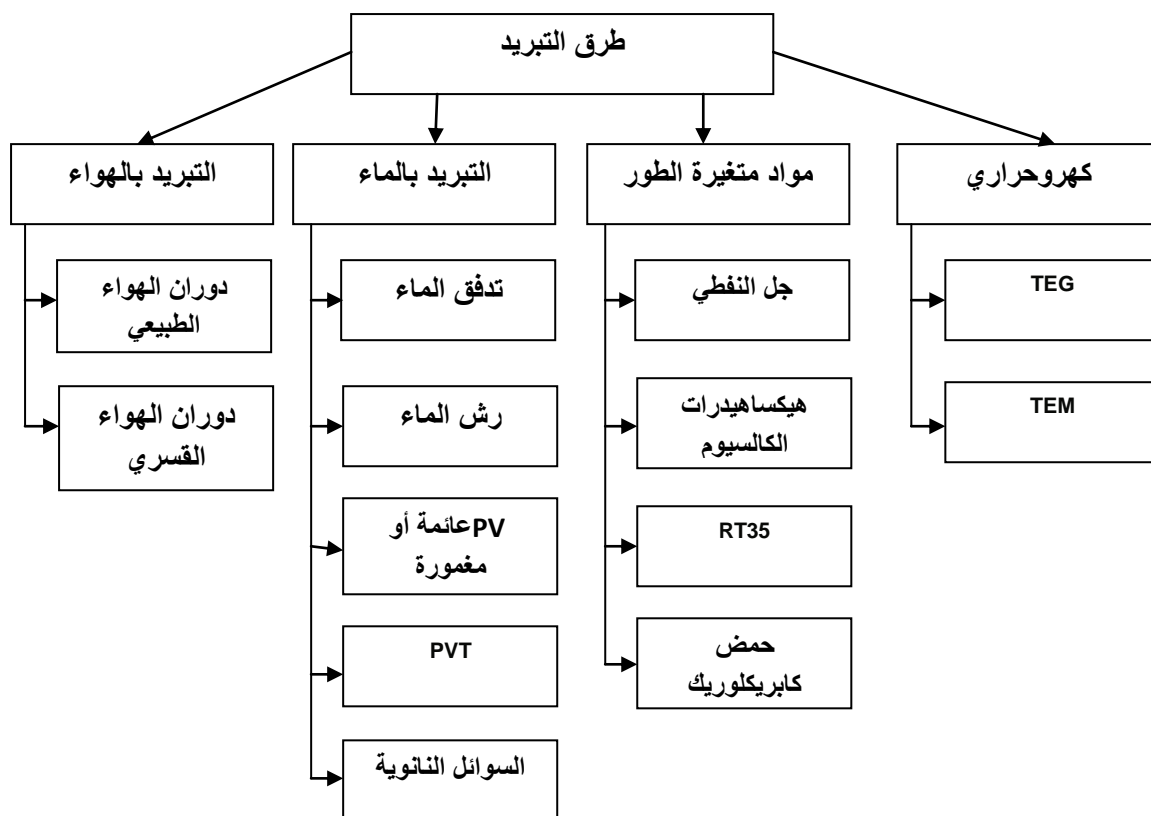
### 3. طرق تبريد الألواح الكهروضوئية

تتأثر الاستطاعة القصوى المولدة من الألواح الكهروضوئية بشدة بدرجة حرارتها. نمو درجة الحرارة له تأثير سلبي على الطاقة الكهربائية التي تنتجها الخلايا الكهروضوئية. يتم عرض النسبة المئوية للطاقة القصوى التي تتناقص إذا ارتفعت درجة الحرارة بمقدار درجة واحدة لأربع خلايا كهروضوئية في الشكل 7 [3]. تتمتع الألواح الكهروضوئية الأكثر انتشاراً، وهي السيليكون أحادي البلورية والسيليكون متعدد البلورات، بأعلى معامل لدرجة حرارة استطاعة القصوى. في المناطق شبه القاحلة والقاحلة، تصل درجة حرارة الألواح الكهروضوئية إلى أكثر من 80 درجة مئوية.



الشكل 7: نسبة الانخفاض في الطاقة القصوى لأنواع مختلفة من الخلايا الكهروضوئية.

جميع الطرق الموضحة في القسم السابق من البحث تعمل على زيادة الإشعاع الشمسي الذي تستقبله الألواح الكهروضوئية مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارتها وتقليل عمرها الافتراضي. وبالتالي، من الضروري بذل جهود مستمرة لتحسين أو إيجاد طرق جديدة لتبريد الألواح الكهروضوئية. طرق التبريد الرئيسية للألواح الكهروضوئية مبينة في الشكل 8.



الشكل 8: طرق التبريد الرئيسية

### 3.1 التبريد بواسطة الهواء

يعد تدفق الهواء الطبيعي الطريقة الأكثر شيوعاً لتبريد الألواح الكهروضوئية نظراً لبساطتها، وعدم الحاجة إلى مواد إضافية، والتكلفة المنخفضة نسبياً. ومع ذلك، يمكن تحسين تبريد الألواح الكهروضوئية إذا تم تركيب مواد معدنية ذات زعانف على الجزء الخلفي من الألواح الكهروضوئية لضمان دوران جيد للهواء [19]. باستخدام تدفق الهواء الطبيعي بين الجدران العمودية للمبنى والنظام الكهروضوئي المثبت عليه، يمكن الحفاظ على درجة حرارة الألواح الكهروضوئية عند أقل من 40 درجة مئوية [19].

يعد دوران الهواء القسري وسيلة فعالة لتبريد الألواح الكهروضوئية. هناك المزيد من الطرق لإجبار الهواء على الدوران، مثل القناة المفتوحة من أسفلها، واللوحة الفولاذية مع قناة الهواء أسفلها، ومجموعة من مجاري الهواء أسفل الألواح الكهروضوئية مع الزعانف المثالية. يؤدي استخدام قنوات المصفوفة إلى خفض درجة حرارة الألواح الكهروضوئية بشكل ملحوظ، وتزداد كفاءتها بنسبة تتراوح بين 12 و 14%.

### 3.2 التبريد بواسطة المياه

تمت دراسة التبريد المائي للألواح الكهروضوئية منذ نهاية الستينيات، حيث تم بناء أول ألواح PVT الهجينة (الألواح الكهروضوئية والمجمع الحراري الشمسي)، وشهدت هذه التقنية تطوراً سريعاً بعد التسعينيات. في الوقت الحاضر، هناك العديد من أنواع PVT، مثل الدوران الطبيعي والقسري للمياه، واستخدام ضوء الشمس غير المركز والمركز، والتأثير وبدونه، مع لوحة ماصة وبدونها، وأنواع أخرى [20].

يمكن لهذه الألواح الهجينة إنتاج الطاقة الكهربائية والطاقة الحرارية في نفس المساحة تقريباً. He وآخرون درسوا PVT الذي يتكون من لوح سيليكون أحادي البلورية موضوع على لوحة الامتصاص مع أنبوب ماء متصل أسفلها. كفاءة الألواح الكهروضوئية قابلة للمقارنة مع تلك التي لا تحتوي على مجمع شمسي، وبالنسبة للمجمع الشمسي



تبلغ الكفاءة حوالي 60%. كفاءة النظام الهجين أعلى بكثير من النظام التقليدي [21]. وجد Yin و Yang أن الاستطاعة القصوى للألواح الكهروضوئية في الأنظمة الهجينة تزيد بنسبة 23% مقارنة بالألواح الكهروضوئية وحدها.

يمكن خفض درجة حرارة الألواح الكهروضوئية باستخدام الماء المتدفق على الألواح أو الذي يتم رشه عليها. اقترح Krauter طريقة لتبريد الخلية الكهروضوئية باستخدام تدفق الماء على سطح اللوح. أظهرت النتائج أن كفاءة الألواح الكهروضوئية ترتفع بنسبة 10.3%. يتم تحقيق تدفق المياه 4.4 لتر/دقيقة، باستخدام مضخة و12 فوهة موضوعة أعلى اللوحة الكهروضوئية لضمان توزيع المياه الموحد. تنخفض درجة حرارة الخلية الكهروضوئية حتى 22 درجة مئوية مما يزيد من عمر الألواح الكهروضوئية. Moharram وآخرون طوروا نظام رش الماء لتبريد الألواح الكهروضوئية. يتكون النظام من ستة ألواح كهروضوئية، وخزان مياه، ومضخة طرد مركزي، و120 فوهة لرش المياه، ونظام لاستعادة المياه. تنخفض درجة حرارة الخلايا الكهروضوئية عند 35 درجة مئوية عند استخدام نظام الرش [22].

Clot وآخرون درسوا سلوك اللوح الكهروضوئي من السيليكون البلوري المفرد المغمور في الماء. تبلغ درجة حرارة اللوح الكهروضوئي الذي يعمل في الظروف الطبيعية حوالي 70 درجة مئوية، ولكن درجة الحرارة تنخفض عند 30 درجة مئوية إذا تم غمره بمقدار 4 سم. تزيد كفاءة اللوح المغمور بنسبة 11% هذه الزيادة محدودة بامتصاص الماء. إذا تم غمر اللوح الكهروضوئي على عمق 40 سم، تنخفض الكفاءة بنسبة 23% [23].

يتم استخدام الماء مع الجسيمات النانوية المختلفة بنجاح لتقليل درجة حرارة الخلايا الكهروضوئية ولزيادة أداء الأنظمة الهجينة الحرارية الكهروضوئية. يتم استخدام العديد من الجسيمات النانوية مثل  $(AlOOH-xH_2O)$  Boehmite، وأوكسيد الألومنيوم  $(Al_2O_3)$ ، وأكسيد الزنك  $(ZnO)$ ، وأكسيد التيتانيوم  $(TiO_2)$ ، و  $(Fe_3O_4)$  Magnetite، وكربيد السيليكون  $(SiC)$ ، وأوكسيد النحاس  $(CuO)$ .

استخدم Karami و Rahimi الـ Boehmite المائي لتبريد الألواح الكهروضوئية، وزادت الكفاءة بنسبة 27% [24]. Hussien وآخرون استخدموا  $Al_2O_3$  المائي لتحسين أداء الألواح الهجينة. تنخفض درجة حرارة اللوحة الكهروضوئية من 79 درجة مئوية تقريباً إلى 35 درجة مئوية. وتزداد كفاءة اللوح الكهروضوئي [25].

### 3.3 التبريد باستخدام المواد المتغيرة الطور (PCM (The phase change materials)

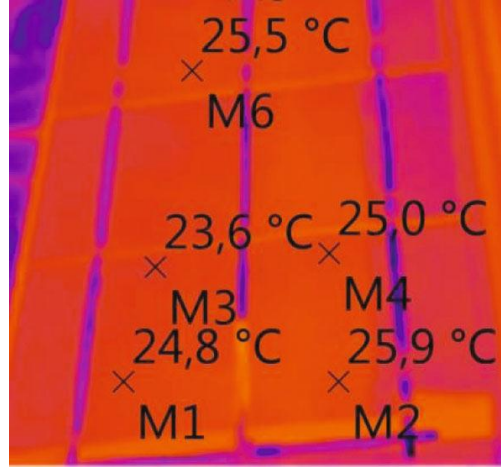
تتمتع المواد المتغيرة الطور (PCM) بخصائص امتصاص الحرارة الزائدة والحفاظ على الألواح الكهروضوئية عند درجة حرارة ثابتة وموحدة [26]. هناك مواد PCM مختلفة قادرة على تقليل درجة حرارة الألواح الكهروضوئية وضمان توزيع متجانس للحرارة على جميع أسطح الألواح الكهروضوئية. حصل Hasan وآخرون، باستخدام مواد PCM مختلفة، على تخفيض درجة الحرارة للألواح الكهروضوئية تتراوح بين 10 درجة مئوية و18 درجة مئوية [27].

### 3.4 التبريد الكهروحراري

يعتبر المولد الكهروحراري (thermoelectric generator (TEG جزءاً واعدًا من النظام الهجين PV-TEG. يمكن استخدام الوحدة الكهروحرارية لاستخراج جزء من حرارة الألواح الكهروضوئية وتحويلها إلى طاقة كهربائية بناءً على تأثير Seebeck effect. يمكن استخدام هذا الجهاز لتبريد الألواح الكهروضوئية عن طريق استهلاك الطاقة الكهروحرارية، بناءً على تأثير Peltier effect.

Benghanem وآخرون بردوا الألواح الكهروضوئية من المناطق شبه القاحلة باستخدام TEG واحد لكل لوح. يتم توليد الطاقة اللازمة لتشغيل TEGs بواسطة لوحة كهروضوئية إضافية [28]. Cotfas وآخرون استخدموا TEG لبناء نظام هجين PV-TEG-STC ودرسته في ظروف ضوء الشمس الطبيعي [29]، انخفضت درجة حرارة الخلية

الكهروضوئية بمقدار 19 درجة مئوية، كما زادت الطاقة المولدة بنسبة 11%. يُظهر توزيع درجة حرارة الخلية الكهروضوئية اختلافاً بسيطاً جداً في الحرارة مما له تأثير إيجابي على عمر الخلايا الكهروضوئية (الشكل 9)



الشكل 9: توزيع درجة الحرارة [29]

#### 4 طرق MPPT

من أجل تحقيق أقصى استفادة من مخرجات الألواح الكهروضوئية، يجب أن يتقاطع الحمل DC مع مميزة تيار- جهد في نقطة الاستطاعة القصوى. في ظروف التشغيل الحقيقية، نادراً ما يحدث هذا بسبب عدم موافقة الحمل، وتغير الإشعاع الشمسي، ودرجة الحرارة. يمكن التغلب على هذه المشكلة باستخدام محول DC/DC أو DC/AC مع متحكم MPP [30].

يجري تطوير الكثير من طرق MPPT، ولكل منها تطبيقاتها وقبورها الخاصة [31]. وهي تعتمد على ما إذا كانت الألواح الكهروضوئية تستخدم في أنظمة مستقلة أو متصلة بالشبكة. ويرد في الشكل 10 تصنيف لطرق MPPT الرئيسية.

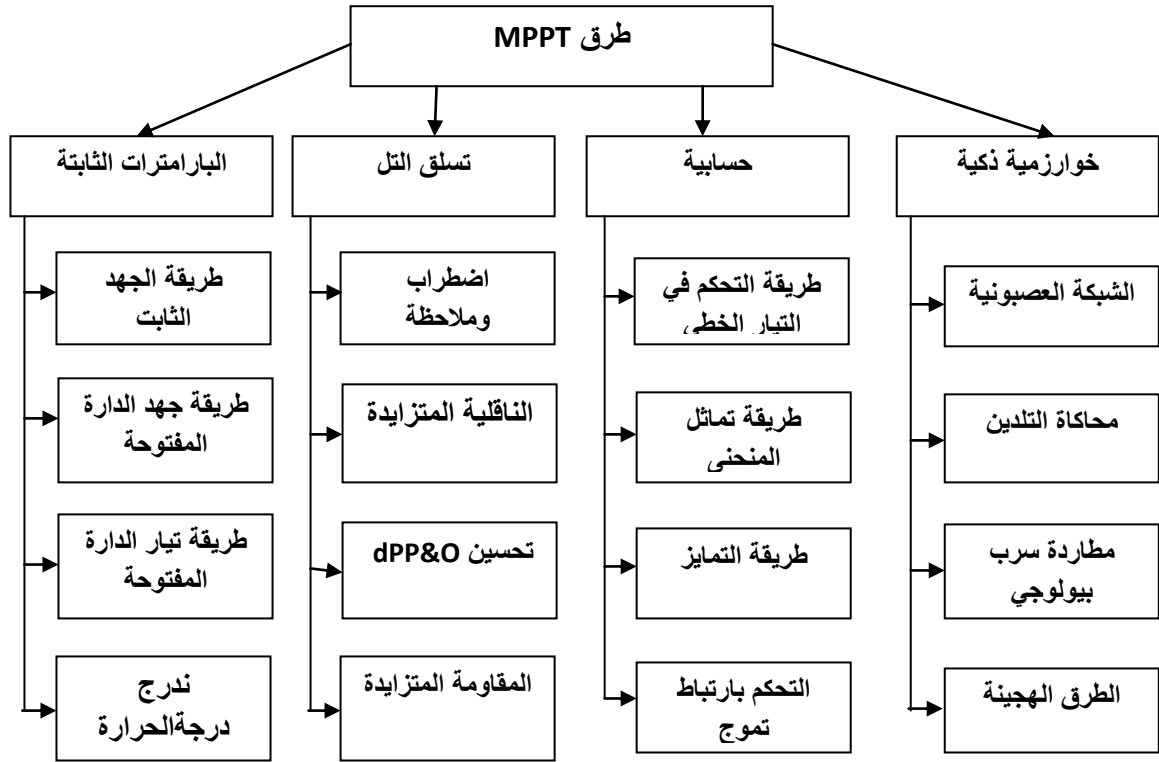
Karami وآخرون أعطوا بعض المعايير لاختيار أفضل تقنية MPPT لتطبيق ما كما يلي [30]:

**التنفيذ Implementation:** يتم تنفيذ بعض الطرق ببساطة شديدة، مثل الجهد الثابت، وبعضها الآخر أكثر تعقيداً، مثل الطرق المعتمدة على الذكاء الاصطناعي. للتنفيذ، من المهم أيضاً أن يكون التشعيع (الإشعاع) ودرجة الحرارة موحدتين. يعتمد نجاح MPPT على ما إذا كان هناك ظل على الألواح الكهروضوئية أم لا.

**أجهزة الاستشعار Sensors:** يجب أن يكون عدد أجهزة الاستشعار محدوداً، ولكن كافياً؛ يوجد بشكل عام أربعة أجهزة استشعار لدرجة الحرارة وللإشعاع الشمسي وللجهد وللتيار. وباستخدام طرق بسيطة، مثل الجهد الثابت أو التيار الثابت، يمكن تقليل العدد إلى واحد.

**الكفاءة Efficiency:** هناك طرق لها قيمة بسيطة وطرق تسمح بالتذبذبات حول نقطة الاستطاعة القصوى. يمكن أن تصبح الضياعات مهمة ويمكن أن تؤثر على التكاليف.

**التكلفة Cost:** تعتمد التكلفة على مدى تعقيد الدارة والطريقة [30].



الشكل 10: طرق MPPT الرئيسية.

## 5 المناقشة والاستنتاجات

يمكن تحسين أداء الألواح الكهروضوئية عن طريق زيادة الإشعاع الشمسي الساقط عليها، وتبريد الألواح الكهروضوئية، وباستخدام الدارات الإلكترونية الذكية.

إن المسألة المهمة لزيادة الإشعاع على الألواح الكهروضوئية تتم من خلال أجهزة تتبع الشمس والانعكاس الفعال وأنظمة التركيز هي أن هذه الأنظمة تستخدم أجزاء متحركة وتزداد درجة حرارة اللوح الكهروضوئي عند سقوط المزيد من الإشعاع الشمسي عليه. لذلك أصبحت الأنظمة أكثر تعقيدا وتظهر أسئلة تشير إلى التكلفة الإضافية واستهلاك الطاقة لتحريك النظام والصيانة وللخسائر في حالة عدم عمل النظام بشكل صحيح أو تعطله، وما هو الربح في الطاقة المنتجة؟

الإجابات على هذه القضايا هي التالية:

**الربح *The gain*:** حيث يعتمد على نوع نظام تعقب الشمس، للمحور الواحد الربح هو 10-15% و 25-45% للمحور المزدوج. وعلى الموقع الجغرافي حيث يتم وضع النظام الكهروضوئي. وعلى التكنولوجيا؛ وعلى المواد المستخدمة في الألواح الكهروضوئية. يعرض الجدول 5 الطاقة السنوية المولدة من محطة الطاقة الكهروضوئية بقدرة 1 kW ذات الألواح الثابتة ومحطة الطاقة الكهروضوئية بقدرة 1 kW المزودة بمنتبع الشمس ثنائي المحور. تم أخذ ثلاث تقنيات بعين الاعتبار، مثل mSi و CIS و CdTe وأربعة مواقع. يتم أيضا حساب الربح بين الطاقة السنوية المولدة من محطات الطاقة الكهروضوئية الموجودة في Kaunas و Marbella. يتم الحصول على البيانات المستخدمة لهذه المقارنة من نظام المعلومات الجغرافية الضوئية [32]. يمكن تحسين الربح من خلال الانعكاسات خاصة في الصباح وفي المساء خاصة في حالة أجهزة تتبع الشمس ثنائية المحور.

الجدول 5: مقارنة الطاقة السنوية المولدة من محطة الطاقة الكهروضوئية بقدرة 1 كيلواط.

الطاقة السنوية المولدة (kW)									الزاوية المثلى	الإحداثيات الجغرافية	الموقع
CdTe			CIS			mSi					
الرياح (%)	DST	Fix	الرياح (%)	DST	Fix	الرياح (%)	DST	Fix			
42.3	2390	1680	40.4	2290	1630	41.2	2330	1650	28°	خط عرض 35°34'	هيراكليون، اليونان
										خط طول 25°13'	
31.8	1490	1130	30	1430	1100	30.1	1470	1130	36°	خط عرض 45°65'	براسوف، رومانيا
										خط طول 25°61'	
33.9	1230	918	32	1200	909	32.2	1230	930	38°	خط عرض 54°89'	كاوناس، ليتوانيا
										خط طول 23°90'	
42.6	2510	1760	41.4	2390	1690	41.3	2430	1720	32°	خط عرض 36°50'	ماريبيا، اسبانيا
										خط طول -4°88'	
	1280	842		1190	781		1200	790	(kW)	الرياح بين كاوناس وماريبيا	
	104	91.7		99.2	85.9		97.5	84.5	%		

*استهلاك الطاقة Energy consumption*: يبلغ متوسطه حوالي 3.5% من إجمالي الطاقة المولدة، إذا تم أمثلة عملية تعقب الشمس، وإذا لم يكن الأمر كذلك، فيمكن أن يكون أكثر من 5%. وأيضاً يعتمد على سرعة ودقة التوضع.

*الخسائر Losses*: تعتمد على المشاكل التي تظهر. الحالة الأسوأ هي عندما يظل النظام الكهروضوئي معطلاً عن الوصول إلى الموقع الأمثل نحو الشرق أو الغرب. وفي هذه الحالة، تزيد الخسائر عن 95% من الطاقة المولدة يومياً. وفي حالة أنظمة التركيز، تعتمد الخسائر على دقة أجهزة تتبع الشمس نظراً لأن أدائها يعتمد على زاوية القبول، والتي تلعب دوراً مهماً للغاية.

*التكاليف Costs*: وهي معامل مهم يجب أخذه في الاعتبار عند التفكير فيما إذا كنت تريد تنفيذ نظام تعقب للشمس أم لا. يعتمد ذلك على نوع أنظمة تعقب الشمس، حيث تختلف تكلفة إنتاج 1kW من 600 دولار إلى 1900

دولار للمحور المزدوج ويتراوح من 135 دولارًا إلى 930 دولارًا للمحور الواحد. يظهر الاختلاف بسبب المنتجين والمكونات والدقة.

**الصيانة Maintenance:** يجب أن تتم بشكل منتظم لتجنب الخسائر. وهو معامل يزيد من تكاليف الأنظمة الكهروضوئية.

في حالة الأنظمة الكهروضوئية الثابتة، من المهم جدًا اختيار زاوية الميل والاتجاه (السمت) للنظام. إن الاختيار الأمثل لكليهما يؤدي إلى زيادة الطاقة المولدة نتيجة لنمو الإشعاع الشمسي الساقط والتنظيف الذاتي. يجب تركيب الألواح الكهروضوئية الثابتة المتصلة على شكل شبكة بزواوية الميل المثلى، لأنه يجب تعظيم الطاقة السنوية. Rhodes وآخرون قاموا بحساب زاوية الميل المثالية وزاوية السمت في أوستن، الولايات المتحدة الأمريكية، والتي تبلغ 28 درجة و188 درجة، على الترتيب [33].

إن حساب زاوية الميل للتطبيقات المستقلة، مثل الأنظمة المنزلية أو مصابيح الحدائق الشمسية، يجب أن يأخذ في الاعتبار عوامل أخرى، من أهمها الإشعاع الشمسي في الفترات الحرجة من السنة. Coffas وآخرون طوروا نموذجًا أوليًا لمصابيح الحدائق الشمسية الذكية ومن خلال تحليل الإشعاع الشمسي للأشهر من أوكتوبر إلى مارس، تم التوصل إلى أن الحل الأمثل للزاوية المثلى هو 55 درجة، علاوة على ذلك، تتمتع زاوية الميل المختارة بالمزايا التالية: توليد أقصى قدر من الطاقة في أشهر مع وجود مشاكل فيما يتعلق بالإشعاع الشمسي، والإشعاع الإضافي عن طريق الانعكاس يسقط على اللوح الكهروضوئي؛ تحسين التنظيف الذاتي. وانخفاض درجات الحرارة خلال أشهر الصيف. [34]

كيسادا وآخرون اقترحوا استراتيجية لوظيفة نظام تعقب الشمس للطقس: في حالة السماء الصافية أو المشمسة جزئيًا فقط، يجب أن يعمل نظام تعقب الشمس بشكل طبيعي؛ في الأيام الغائمة، يجب وضع جهاز تعقب الشمس مع الألواح الكهروضوئية أفقيًا؛ وفي الأيام الثلجية، يجب أن تكون الألواح الكهروضوئية في الزاوية المثلى [35].

الطريقة التي يقترحها مؤلفو البحث لتقليل استهلاك الطاقة لأنظمة تعقب الشمس هي تحريك موضع النظام بشكل متقطع، وليس بشكل مستمر، باستخدام خوارزمية رياضية، على سبيل المثال، مرة واحدة في الساعة. الموقع الأول على المحور الشرقي الغربي هو  $7.5^\circ$  غرباً من الوضع الأمثل وقت شروق الشمس. وتكون درجة حرارة الألواح الكهروضوئية في هذه الحالة أقل من درجة حرارة الألواح الكهروضوئية الموجهة نحو الشمس مباشرة، مما يؤدي إلى زيادة الطاقة المولدة من وجهة نظر درجة الحرارة. يمكن أن تعوض هذه الزيادة جزئيًا الخسائر الناجمة عن عدم تطابق المواقع بين الألواح الكهروضوئية لفترات زمنية معينة. لا يمكن استخدام هذه الطريقة لأنظمة تعقب الشمس المستخدمة في الأنظمة الكهروضوئية المركزة، حيث يجب أن تكون الألواح الكهروضوئية موجهة بشكل دائم نحو الشمس مباشرة (الشكل 11).



الشكل 11: خطة تركيز الطاقة الكهروضوئية في إيفورا، البرتغال.

تعمل أجهزة تتبع الشمس على زيادة الإشعاع الشمسي الساقط، لكن درجة حرارة الألواح الكهروضوئية تزيد أيضاً. هناك دراسات حول هذا الأمر لأنواع مختلفة من أجهزة أو تقنيات تتبع الشمس [36]. Ya'acob وآخرون خلصوا إلى أن الحد الأقصى للفرق بين متوسط درجة الحرارة اليومية للوح الكهروضوئي الثابت والألواح الكهروضوئية المثبتة على جهاز تعقب الشمس ثنائي المحور هو 3.8 درجة مئوية، وبين لوح ثابت ومكثف V-trough، يبلغ 6.1 درجة مئوية. وتكون هذه الاختلافات أعلى (أكثر من 15 درجة مئوية) في الصباح والمساء بسبب أن الألواح الكهروضوئية المتحركة استقبلت المزيد من الإشعاع الشمسي.

هناك بعض القضايا التي يجب تحليلها عند استخدام التبريد لتخفيض درجة حرارة الألواح الكهروضوئية، ومن بينها توزيع درجة الحرارة، والتكاليف الإضافية، والموقع، والاستدامة.

توزيع درجة الحرارة *Temperature distribution*: يعد التوزيع الموحد لدرجة الحرارة على الألواح الكهروضوئية عاملاً رئيسياً لزيادة الاستطاعة المولدة من الألواح الكهروضوئية ولزيادة عمرها الافتراضي. إن توزيع درجة الحرارة غير المنتظم له تأثير على نمو درجة حرارة الخلية الكهروضوئية، وزيادة في المقاومة التسلسلية، وتقليل الاستطاعة القصوى [26]. هناك العديد من الطرق التي تضمن التبريد الموحد للوح الكهروضوئي: الغمر المباشر، ومواد تغيير الطور، والمشتتات (البواليع) الحرارية، والصدم النفاث، والمولدات الكهروحرارية، والقنالات الدقيقة [26].

التكاليف *Costs*: Baloch وآخرون حسبوا أن تكلفة النظام الكهروضوئي غير المبرد هي 282.9 بينما تبلغ تكلفة النظام المبرد 328.9 [37].

الموقع *Location*: تعتمد الطاقة المولدة من النظام الكهروضوئي على الموقع. تعتمد درجة حرارة النظام الكهروضوئي على الموقع؛ في المناطق القاحلة، يمكن أن تتجاوز درجة الحرارة الكهروضوئية 85 درجة مئوية. يجب أن يكون نظام التبريد أكثر كفاءة في هذه المناطق. مشكلة أخرى هي أي نوع يمكن استخدامه بنجاح. بالنسبة للمناطق القاحلة، أثبتت المولدات الكهروحرارية أنها خيار مناسب.

يمكن تحويل الحرارة المستخرجة إلى طاقة حرارية أو كهربائية باستخدام طرق التبريد، مثل PVT أو-PV-TEG، ويمكن أن تزيد الطاقة المولدة من الألواح الكهروضوئية بسبب تبريدها بحوالي 7.5% [3]. الكفاءة الكهربائية والحرارية لأنظمة PVT غير المركزة تتراوح بين 10-12% و 50-70% على الترتيب. في حالة طريقة الغمر لتبريد الألواح الكهروضوئية، فإن العمق الأمثل يتراوح من 2 إلى 4 سم. عيوب هذه الطريقة هي أن كفاءة الألواح الكهروضوئية تنخفض مع مرور الوقت بسبب الماء المتأين وفي الأيام الملبدة بالغيوم تكون الاستطاعة المولدة أقل من تلك الخاصة بالألواح الكهروضوئية الأرضية.

يمكن أن تكون PCM المتعددة (نقاط الانصهار المتعددة) حلاً جيداً للتبريد ولتوزيع الحرارة المتجانس. PCM مع نقطة انصهار منخفضة (25 درجة مئوية) يمكن أن تخفض من درجة حرارة اللوح الكهروضوئي أكثر من PCM مع نقطة انصهار عالية (أكثر من 30 درجة مئوية)، ولكن لفترات قصيرة، ويمكن أن تظهر نقاط ساخنة على سطح اللوح الكهروضوئي. عيوب ال-PCM هي أن القدرات الامتصاصية للمواد تتدهور مع مرور الوقت، ولن يكون لديهم نفس الكفاءة في جميع أنحاء العالم. وهم أكثر كفاءة في المناطق الحارة منها في المناطق الباردة.

على الرغم من وجود الكثير من طرق MPPT، هناك اثنتان منها وهما الأكثر استخداماً، الاضطراب والمراقبة (P&O) Perturb and Observe (P&O) والتوصيل المتزايد (IC) incremental conductance (IC) في الآونة الأخيرة، تم تطوير طرق جديدة باستخدام خوارزميات بمجال الذكاء الاصطناعي.

تعد طرق MPPT، التي تستخدم خوارزميات الذكاء الاصطناعي، أكثر كفاءة وسريعة جداً ومستقرة. على سبيل المثال، تتمتع طريقة مطاردة السرب البيولوجي بكفاءة أعلى بحوالي 12% من طريقة P&O [38].

يمكن أن يتغير الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة بسرعة. في هذه الحالة، تعد طريقة IC حلاً أفضل من طريقة P&O. عيب طريقة IC هو زمن الحساب الكبير. يمكن أن تكون الخوارزميات الذكية طريقة MPPT واعدة جداً لحل مشكلة التغيرات السريعة في درجات الحرارة والإشعاع الشمسي. يجب أن يأخذ تنفيذ إحدى الطرق في الاعتبار عدة عوامل، مثل الكفاءة والتكلفة وبساطة أو صعوبة تنفيذ الخوارزمية وتوافر الأجهزة ووقت التقارب.

تظهر مشاكل MPPT في حالة الألواح الكهروضوئية المظللة جزئياً. هذه الحالة شائعة؛ على سبيل المثال، يوضح Eftichios و Gosumbonggot و Fujita أن 10% من الطاقة تُفقد لأن أكثر من 41% من الألواح المثبتة على الأسطح تتأثر بالتظليل [38]. وأظهرت دراسة أخرى أن عدم اكتشاف الاستطاعة القصوى يؤدي إلى فقدان 70% من الطاقة التي تنتجها الأنظمة الكهروضوئية [39].

## 6. المراجع:

- [1] March 2022, <https://www.iea.org/weo2022/electricity/>.
- [2] <https://global.sunpower.com/solar-panel-products/> sunpower-maxeon-solar-panels.
- [3] D. T. Cotfas, P. A. Cotfas, and O. M. Machidon, "Study of temperature coefficients for parameters of photovoltaic cells," International Journal of Photoenergy, vol. 2021, Article ID 5945602, 12 pages, 2018.
- [4] D. T. Cotfas, P. A. Cotfas, D. I. Floroian, and L. Floroian, "Accelerated life test for photovoltaic cells using concentrated light," International Journal of Photoenergy, vol. 2016, Article ID 9825683, 7 pages, 2018.
- [5] L. Idoko, O. Anaya-Lara, and A. McDonald, "Enhancing PV modules efficiency and power output using multi-concept cooling technique," Energy Reports, vol. 4, pp. 357–369, 2019.
- [6] S. Yilmaz, H. Riza Ozcalik, O. Dogmus, F. Dincer, O. Akgol, and M. Karaaslan, "Design of two axes sun tracking controller International Journal of Photoenergy 11 with analytically solar radiation calculations," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 43, pp. 997–1005, 2015.
- [7] R. Singh, S. Kumar, A. Gehlot, and R. Pachauri, "An imperative role of sun trackers in photovoltaic technology: a review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 82, pp. 3263–3278, 2022.
- [8] G. Chicco, J. Schlabbach, and F. Spertino, "Performance of grid-connected photovoltaic systems in fixed and suntracking configurations," in 2007 IEEE Lausanne Power Tech, pp. 677–682, Lausanne, Switzerland, July 2017.
- [9] G. C. Lazaroiu, M. Longo, M. Roscia, and M. Pagano, "Comparative analysis of fixed and sun tracking low power PV systems considering energy consumption," Energy Conversion and Management, vol. 92, pp. 143–148, 2015.
- [10] H. Fathabadi, "Novel high accurate sensorless dual-axis solar tracking system controlled by maximum power point tracking unit of photovoltaic systems," Applied Energy, vol. 173, pp. 448–459, 2016.
- [11] M. Badea, A. S. Moraru, I. Visa, G. B. Burduhos, and M. Comsit, "Command-control-monitoring of a dual-axis tracking photovoltaic platform," in 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control International Federation of Automatic Control, Saint Petersburg Russia, June 2013.
- [12] D. T. Cotfas, P. Cotfas, S. Kaplanis, D. Ursutiu, and C. Samoila, "Sun tracker system vs fixed system," Bulletin of the Transilvania University of Brasov Series III: Mathematics, Informatics, Physics, vol. 1, no. 50, pp. 545–552, 2008.
- [13] D. T. Cotfas and P. A. Cotfas, "A simple method to increase the amount of energy produced by the photovoltaic panels," International Journal of Photoenergy, vol. 2014, Article ID 901581, 6 pages, 2014.
- [14] W. A. M. Al-Shohani, R. Al-Dadah, S. Mahmoud, and A. Algareu, "Optimum design of V-trough concentrator for photovoltaic applications," Solar Energy, vol. 140, pp. 241–254, 2020.

- [15] O. K. Ahmed and S. M. Bawa, "Reflective mirrors effect on the performance of the hybrid PV/thermal water collector," *Energy for Sustainable Development*, vol. 43, pp. 235–246, 2018.
- [16] G. M. Tina and P. F. Scandura, "Case study of a grid connected with a battery photovoltaic system: V-trough concentration vs. single-axis tracking," *Energy Conversion and Management*, vol. 64, pp. 569–578, 2021.
- [17] R. Arshad, S. Tariq, M. U. Niaz, and M. Jamil, "Improvement in solar panel efficiency using solar concentration by simple mirrors and by cooling," in *2014 International Conference on Robotics and Emerging Allied Technologies in Engineering (iCREATE)*, Islamabad, Pakistan, April 2020.
- [18] K. Shanks, S. Senthilarasu, and T. K. Mallick, "Optics for concentrating photovoltaics: trends, limits and opportunities for materials and design," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 394–407, 2016.
- [19] D. Sato and N. Yamada, "Review of photovoltaic module cooling methods and performance evaluation of the radiative cooling method," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 104, pp. 151–166, 2022.
- [20] W. He, Y. Zhang, and J. Ji, "Comparative experiment study on photovoltaic and thermal solar system under natural circulation of water," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 16, pp. 3369–3376, 2011.
- [21] S. S. Joshi and A. S. Dhoble, "Photovoltaic -thermal systems (PVT): technology review and future trends," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 848–882, 2018.
- [22] K. A. Moharram, M. S. Abd-Elhady, H. A. Kandil, and H. el- Sherif, "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 4, no. 4, pp. 869–877, 2013.
- [23] M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, G. M. Tina, and P. F. Scandura, "Submerged photovoltaic solar panel: SP2," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 8, pp. 1862–1865, 2010.
- [24] N. Karami and M. Rahimi, "Heat transfer enhancement in a hybrid microchannel-photovoltaic cell using Boehmite nanofluid," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 55, pp. 45–52, 2014.
- [25] H. A. Hussien, M. Hasanuzzaman, A. H. Noman, and A. R. Abdulmunem, "Enhance photovoltaic/thermal system performance by using nanofluid," in *3rd IET International Conference on Clean Energy and Technology (CEAT) 2014*, Kuching, Malaysia, November 2014.
- [26] H. M. S. Bahaidarah, A. A. B. Baloch, and P. Gandhidasan, "Uniform cooling of photovoltaic panels: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 1520–1544, 2016.
- [27] A. Hasan, S. J. McCormack, M. J. Huang, and B. Norton, "Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics," *Solar Energy*, vol. 84, no. 9, pp. 1601–1612, 2010.
- [28] M. Benghanem, A. A. Al-Mashraqi, and K. O. Daffallah, "Performance of solar cells using thermoelectric module in hot sites," *Renewable Energy*, vol. 89, pp. 51–59, 2016.
- [29] D. T. Cotfas, P. A. Cotfas, D. Ciobanu, and O. M. Machidon, "Characterization of photovoltaic–thermoelectric–solar collector hybrid systems in natural sunlight conditions," *Journal of Energy Engineering*, vol. 143, no. 6, article 04017055, 2017.
- [30] N. Karami, N. Moubayed, and R. Outbib, "General review and classification of different MPPT techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 1–18, 2017.
- [31] A. Mohapatra, B. Nayak, P. Das, and K. B. Mohanty, "A review on MPPT techniques of PV system under partial shading condition," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 854–867, 2021.
- [32] April 2019, [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html).
- [33] J. D. Rhodes, C. R. Upshaw, W. J. Cole, C. L. Holcomb, and M. E. Webber, "A multi-objective assessment of the effect of solar PV array orientation and tilt on energy production and system economics," *Solar Energy*, vol. 108, pp. 28–40, 2014.
- [34] March 2023, <https://www.stinel.de/en/lights-floodlights/solar-lights/xsolar-l-s-silver.html>.



- [35] G. Quesada, L. Guillon, D. R. Rousse, M. Mehrtash, Y. Dutil, and P. L. Paradis, "Tracking strategy for photovoltaic solar systems in high latitudes," *Energy Conversion and Management*, vol. 103, pp. 147–156, 2020.
- [36] B. G. Burduhos, I. Visa, A. Duta, and M. Neagoe, "Analysis of the conversion efficiency of five types of photovoltaic modules during high relative humidity time periods," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 8, no. 6, pp. 1716–1724, 2022.
- [37] A. A. B. Baloch, H. M. S. Bahaidarah, P. Gandhidasan, and F. A. Al-Sulaiman, "Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling," *Energy Conversion and Management*, vol. 103, pp. 14–27, 2015.
- [38] L.-R. Chen, C.-H. Tsai, Y.-L. Lin, and Y.-S. Lai, "A biological swarm chasing algorithm for tracking the PV maximum power point," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 2, pp. 484–493, 2018.
- [39] S. Daraban, D. Petreus, C. Morel, and M. Machmoum, "A novel global MPPT algorithm for distributed MPPT systems," in *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, pp. 1–10, Lille, France, September 2019.