

"دراسة وتصميم نموذج مصغر لجهاز محاكاة الاشعاع الشمسي وتحليل أدائه"

سمر خريزاتي* كريمة سكر** أحمد شرم***

*طالبة دراسات عليا (ماجستير) قسم نظم القدرة، كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية، جامعة حلب
**أستاذة مساعدة في قسم نظم القدرة الكهربائية، كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية، جامعة حلب
***أستاذ مساعد في قسم نظم القدرة الكهربائية، كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية، جامعة حلب

الملخص

نظراً للحاجة الكبيرة لدراسة الطاقة الكهروضوئية وإجراء التجارب على الألواح الشمسية وفق ظروف العمل المخبرية المختلفة، قمنا بالبحث وإجراء الدراسة المرجعية لأجهزة المحاكاة الشمسية المستخدمة عالمياً. حيث تمت دراسة ومقارنة أنواع مختلفة من المصابيح الشائعة، وبناءً عليه تم تصميم نموذج مخبري محلي وبكلفة مناسبة مع كامل المعدات الأساسية والمهمة للحصول على مصدر ضوئي يحاكي لدرجة معينة ضوء الشمس الطبيعي. وبالاعتماد على هذا المصدر الضوئي تمكنا من القيام بدراسة تجريبية على نموذج كهروضوئي معدّ لدراسة واختبار حالات عمل مختلفة، مع القيام بتحليل النتائج وحساب مردود عمل النظام الكهروضوئي للنموذج المقدم.

الكلمات المفتاحية: جهاز المحاكاة الشمسية Solar simulator، كمين الإضاءة، الاشعاع الضوئي.

"Study and design a mini-model of solar radiation simulator and analyze its performance"

Samar Khrizaty* Karima Sukkar Ahmad Sharam *****

*Postgraduate Student (MSc.) Dept. Of Electrical Power Systems Engineering,
Faculty of Electrical and Electronic Engineering, University of Aleppo.

** Dept. Of Electrical Power Systems Engineering, Faculty of Electrical and
Electronic Engineering, University of Aleppo.

*** Dept. Of Electrical Power Systems Engineering, Faculty of Electrical and
Electronic Engineering, University of Aleppo.

Abstract

Due to the great need to study photovoltaic energy and conduct experiments on solar panels according to different laboratory working conditions, we have researched and referenced solar simulators used worldwide. Where different types of common lamps were studied and compared, and accordingly a local laboratory model was designed at an appropriate cost with all the basic and important equipment to obtain a light source that simulates to a certain degree the natural sunlight. By relying on this light source, we were able to conduct an experimental study on a photoelectric model designed to study and test different work cases, while analyzing the results and calculating the performance of the photoelectric system for the presented model.

Keywords: Solar simulator, Light case, light radiation.

المقدمة:

تعتبر دراسة وتطوير أنظمة الطاقة الشمسية من أهم الطرق لزيادة إنتاج الطاقة الكهربائية حالياً، وهو الذي تسعى إليه جميع الاتجاهات العالمية. وبما أنّ ضوء الشمس يتعرض لتغيرات كثيرة أثناء اليوم الواحد وأثناء الفصول، وأيضاً في المناطق التي تعاني من نقص الطاقة الشمسية الطبيعية، فإن استخدام جهاز المحاكاة الشمسية Solar simulator في المختبر بدلاً من العمل في الظروف الخارجية تحت ضوء الشمس يُمكن من القياس في ظروف غير محددة ومستمرة ولا تعتمد على ضوء الشمس أثناء النهار أو التغيرات الفصلية السنوية المختلفة، كما يُمكن من إعادة هذه القياسات والحصول على نتائج دقيقة، ويوفّر أيضاً إمكانية توسيع البحث بسبب قابلية الضبط لقدرة الخرج والطيف المنبعث.

يُعرّف المحاكى الشمسي solar simulator بأنه جهاز ينتج ضوءاً مماثلاً تقريباً لضوء الشمس الطبيعي. والغرض من هذا الجهاز هو إجراء الاختبارات تحت ظروف تشغيل معينة لكل من الخلايا الضوئية والخلايا الشمسية، كذلك اللدائن والواقيات الشمسية وغيرها من المواد الأخرى التي تحتاج للضوء الشمسي.

وعلى مدار التاريخ تم استخدام أجهزة المحاكاة الشمسية بشكل أساسي في أبحاث الخلايا الكهروضوئية والأبحاث الفضائية، وفي صناعة البلورات، واختبار المواد.

المراحل التاريخية لتطوير جهاز المحاكاة الشمسية:

في وقت مبكر من تطوير تقنية الخلايا الشمسية، تم اختبار أداء الخلايا الكهروضوئية في الهواء الطلق أو في الداخل باستخدام مصادر الضوء الاصطناعي التي تحتاج إلى معايرتها بواسطة الخلايا الكهروضوئية القياسية أو مقياس الحرارة. وحيث كانت الحاجة لمحاكي شمسي يمكنه توفير أساساً مشتركاً لمقارنة الخلايا الشمسية وأيضاً توفير بيانات لتصميم المصفوفات الكبيرة هو أمر مهم لتطوير الخلايا الكهروضوئية الشمسية. لذلك تم التعرف على حاجة الصناعة لاختبار الخلايا الشمسية والأجهزة الأخرى في ظروف محاكاة جيدة التحكم.

استخدم جهاز محاكاة الطاقة الشمسية الذي صممه Hoffman Electronics Corp

مزيجاً من مصباح قوس الزينون ومصباح التنغستن كمصدر للضوء، وكذلك المحاكي الذي طوره مختبر Optical Coating Laboratory. أيضاً قامت شركة Spectrolab Corp بتصنيع أجهزة محاكاة الطاقة الشمسية القياسية، والتي تستخدم طريقة مصادر الضوء المعدلة بواسطة المرشحات الضوئية منذ عام 1962 [1]. ويمكن أيضاً استخدام الغازات الخاملة لتعديل مصادر الضوء [2].

في بداية السبعينيات، وبسبب تطور صناعة الخلايا الكهروضوئية، أصبح وضع طريقة قياس قياسية (بما في ذلك جهاز محاكاة الطاقة الشمسية) أمراً ملحاً. ويمكن تلخيص أهمية الطريقة القياسية على النحو التالي [3]:

- تحديد أداء سلسلة من العينات من مصدر واحد.
 - مقارنة عينات من تصاميم مختلفة.
 - دراسة التغيرات الطارئة على أداء الجهاز بفترات زمنية مختلفة.
 - توفير بيانات تصميم النظم للمهندسين وخبراء التسويق.
- ولهذا السبب، تم وضع أول معيار لإجراء اختبار الخلايا الشمسية في عام 1975 [4]، والذي تم تحديثه في عام 1977 [5].

في عام 1978، بدأت أنشطة كتابة المعايير للوصول إلى طرق قياسية لقياس الأداء الكهربائي للأجهزة الكهروضوئية في اللجنة الفرعية المعنية بأنظمة الطاقة الكهروضوئية التابعة للجنة ASTM E-44 [3]. بعد عام واحد، تم أيضاً الرجوع إلى وثيقة لجنة المجتمعات الأوروبية التي تصف الأساليب الموحدة لقياس الأداء [6]. بعد فترة طويلة من الدراسة والاستشارة [7]، [8]، أصبحت سلسلة من معايير ASTM المنقحة متاحة أخيراً في عام 1985 [9]. حيث تم اعتبار جهاز محاكاة الطاقة الشمسية المرفق الرئيسي لنظام القياس الكهروضوئي في البحث أو الصناعة، وأن دقته ستؤثر بشكل كبير على خطأ القياس [7]، [10].

وبما أن خصائص مميزة العمل (I-V) لخلية PV تتسم بالحساسية للطيف والكثافة ودرجة الحرارة [11]، لذا فلا بد من البحث عن مصادر ضوء جديدة وتطوير نظام ضوئي أكثر دقة استناداً إلى المعايير الموضوعية. ثم كان التركيز الثاني لتصميم محاكي الطاقة

الشمسية الكهروضوئية هو خفض متوسط الطاقة وتقلب درجات الحرارة الناجم عن التعرض المطول للضوء [12]، [13]، والذي أمكن تحقيقه بالوصول لما يسمى المحاكي الشمسي النبضي. واستمر العمل البحثي للمحاكاة المتعددة المصادر، الذي كان يهدف إلى تطوير إنتاج طيف أكثر دقة [14]، [15]. مع التطور السريع لتقنية الصمام الثنائي الباعث للضوء (LED) في نهاية التسعينيات، تحولت أجهزة المحاكاة نحو مصدر الضوء الجديد هذا لما لها من مزايا هامة: انخفاض التكلفة، وصغر الحجم، وعمر التشغيل الطويل، وكفاءة الطاقة العالية [16]. لكن انخفاض كثافة الضوء يمثل المشكلة الرئيسية في تصاميم المحاكي الشمسية التي تقوم على المصدر الضوئي LED بشكل كامل [16] [17]. ونظراً للمزايا الفريدة التي يتمتع بها مصباح LED وتطوره السريع، فإن أجهزة المحاكاة الشمسية LED سوف تكون جديرة بالاهتمام وتصبح الجيل التالي من أجهزة المحاكاة الشمسية القياسية في المستقبل.

تستخدم أجهزة المحاكاة الشمسية أساساً لتقييم الخلايا الشمسية وكذلك لأنواع مختلفة من التطبيقات التي تحتاج إلى ضوء الشمس في ظروف محددة. التطبيقات الأكثر شهرة في استخدام Solar simulator [18]:

- دراسة النباتات تحت ظروف بيئية معينة (اختبار سلوك النباتات عند أطيايف إشعاعات مختلفة).
- قياس نفاذية الطاقة الكلية لمساحات كبيرة من الأجزاء المصنعة الشفافة والحواجز الشمسية.
- العلاج بأشعة الشمس في الطب.
- قياس قدرة الخلايا الشمسية، والألواح الشمسية.
- اختبار قدرة المجمعات الشمسية.
- اختبار معدل تباطؤ إنتاجية الخلايا الشمسية بمرور الزمن.

ولكن في الغالب إنّ هذه الأجهزة تحتاج إلى كلفة عالية في تصنيعها وتشغيلها وصيانتها، وكذلك صعوبة في الحصول على جهاز اصطناعي يُنتج طيفاً مماثلاً لطيف الشمس.

أهمية البحث:

اعتماداً على الدراسات المقدمة والتصاميم السابقة لجهاز المحاكاة الشمسية تم في هذا البحث تصميم وتصنيع نموذج مصغر محلي الصنع لمحاكاة الإشعاع الشمسي بتكلفة منطقية ومقبولة حسب الإمكانيات المتوفرة في سوريا. يسمح هذا النموذج بالمحاكاة وفق درجات مختلفة من الإشعاع وكذلك على بعد متغير ويزوايا مختلفة لتوضع اللوح الكهروضوئي، ليتم بذلك احتواء ودراسة كافة الحالات الممكنة.

طريقة البحث:

- 1- دراسة تحليلية لجهاز المحاكاة الشمسية والأجزاء الأساسية التي يتكون منها.
 - 2- دراسة تحليلية للأطياف الضوئية لمصابيح مختلفة ومقارنتها مع الطيف الضوئي للشمس.
 - 3- تصميم الكيبين وملحقاته بالحجم المناسب ودراسة تجريبية لتوزيع المصابيح المستخدمة ضمنه للحصول على الإشعاع الضوئي الأنسب للعمل بشكل أمثل.
 - 4- تحليل النتائج من استخدام هذا النموذج المحلي الصنع.
- وفق المعايير IEC 60904-9 Edition 2 و ASTM E927-10 يقيم الضوء الصادر من المحاكي الشمسي بثلاثة أبعاد [18]:

- نوع الطيف.
- التوزيع المساحي الضوئي.
- الاستقرار الزمني.

حيث يتم تصنيف كل بُعد في إحدى الفئات الثلاث: A, B, C. ويتم تحديد المواصفات المطلوبة لكل فئة في الجدول (1). حيث يُشار إلى جهاز محاكاة الطاقة الشمسية الذي يفي بمواصفات الفئة A في جميع الأبعاد الثلاثة بالمحاكي الشمسي من الفئة A، أو أحياناً فئة AAA (بالإشارة إلى كل من الأبعاد بالترتيب المذكور أعلاه) ويبين الشكل (1) المحاكي الشمسي AAA [18].

جدول (1): مواصفات الفئة ASTM

التصنيف	مماثلة الطيف الطبيعي (لكل مرحلة)	عدم التماثل المكاني للاشعاع	عدم الاستقرار الزمني
Class A	0.75–1.25	2%	2%
Class B	0.6–1.4	5%	5%
Class C	0.4–2.0	10%	10%



الشكل (1): المحاكى الشمسي المخبري فئة AAA

تقسم أجهزة المحاكاة الشمسية إلى ثلاث فئات: مستمرة، ومآضة، ونبضية [19]. النوع الأول: هو شكل مألوف لمصدر الضوء تكون فيه الإضاءة مستمرة. غالباً ما تُستخدم هذه الفئة للاختبار منخفض الكثافة، بدءاً من أقل من شمس واحدة وحتى عدة شمس. يتم تعريف الشمس الواحدة عادةً على أنها الكثافة الاسمية الكاملة لضوء الشمس في يوم صافٍ ساطع على الأرض، والذي يقاس بـ 1000 W/m^2 . قد تحتوي المحاكيات الشمسية للضوء المستمر على عدة أنواع مختلفة من المصابيح مجتمعة (مثال، مصدر قوس واحد ومصباح هالوجين أو أكثر) لتمديد الطيف قدر أكبر في الأشعة الحمراء. النوع الثاني: هو المحاكاة الوامضة التي تشبه نوعياً التصوير بالفلاش. مع فترات

نموذجية تصل إلى عدة أجزاء من الألف من الثانية، يمكن أن تكون الشدة عالية جدًا تصل إلى عدة آلاف وحدة شمسية. غالبًا ما يستخدم هذا النوع لمنع ازدياد درجة الحرارة للجهاز الذي يتم اختباره. ومع ذلك، نظرًا للتسخين والتبريد السريع للمصباح، فإن شدة وطيف الضوء عابران بطبيعتهما، مما يجعل الاختبار الصحيح المتكرر أكثر صعوبة من الناحية الفنية. لا ينطبق بُعد الاستقرار الزمني للمعيار بشكل مباشر على هذه الفئة من أجهزة محاكاة الطاقة الشمسية، على الرغم من أنه يمكن استبداله بمواصفات تكرار مماثلة من لقطة إلى لقطة.

النوع الثالث من أجهزة محاكاة الطاقة الشمسية هو المحاكي النبضي، والذي يستخدم مفتاحاً لحجب أو إلغاء الضوء من مصدر مستمر. هذه الفئة عبارة عن حل وسط بين المستمر والفاش، مع وجود عيوب في الاستخدام العالي للطاقة وكثافة منخفضة نسبيًا لأجهزة المحاكاة المستمرة، ولكنها تتميز بثبات كل من كثافة الخرج وشدة الطيف. كما توفر مدة الإضاءة القصيرة أيضًا فائدة الأحمال الحرارية المنخفضة.

تتكون مصادر الإضاءة المتوفرة تجاريًا من المصباح، الذي يكون قلب الجهاز بالكامل، والكيبين الذي يحتوي على عاكس، والبصريات ونظام التبريد، وأخيرًا مصدر الطاقة [20].

الأجزاء الأساسية للمحاكي:

• المصدر الضوئي

يعتبر اختيار مصدر الضوء المناسب لمحاكاة ضوء الشمس وشدته أهم عمل لتصميم محاكي الطاقة الشمسية. يتم فحص مصدر الضوء لمحاكاة الإشعاع الشمسي وفق مايلي [20]:

- الصفات الطيفية.
- توحيد الإضاءة.
- توازي الحزم الإشعاعية.
- استقرار التدفق.
- مدى التدفق الذي يمكن الحصول عليه.

في تاريخ المحاكاة الشمسية، تم اقتراح العديد من المصاييح، والتي يمكن إدراجها على

النحو التالي: مصباح القوس الكربوني، مصباح القوس الهاليدى المعدني، مصباح الهالوجين تنغستن الكوارتز، مصباح القوس الزينون، مصباح الزينون الزئبقي، مصباح القوس الأرجون ومصباح الصمام الثنائي الباعث للضوء(LED).

• مركز الأشعة أو المجمع

نظراً لحقيقة أن مصادر الضوء المستخدمة في المحاكيات الشمسية هي مصادر تقريباً خطية، يتم تطبيق الأنظمة الضوئية عادة للحصول على توزيع التدفق المطلوب في الاختبار. المركز الضوئي هو المكون الضوئي الرئيسي لكل نظام محاكاة شمسي، خاصة لمحاكيات الطاقة الشمسية عالية التدفق. وظائفها الرئيسية هي [21]:

- العمل كمجمع لتجميع الإشعاع الضوئي المختلف الاتجاه المنبعث من مصدر الضوء ووضعه في الاتجاه المطلوب.

- زيادة كثافة تدفق الطاقة الضوئية لتلبية المتطلبات.

في تاريخ تصميم المحاكى الشمسي، تم اختيار العاكس الإهليلجي، المكثف المكافئ المركب (CPC)، المخروط الضوئي، المكثف الزائد، مكثف القطع المكافئ وعدسة فريسنل في تصميمات محاكاة شمسية مختلفة.

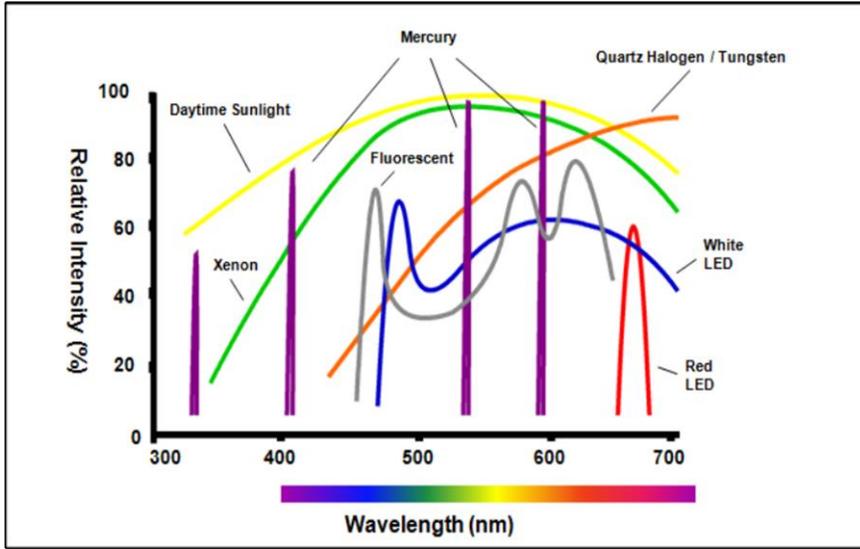
تصميم جهاز المحاكاة التجريبي المحلي:

• اختيار المصدر الضوئي المناسب:

اعتماداً على دراسات ومراجع متعددة تمت دراسة الأطياف الضوئية لعدد من المصابيح المختلفة وتحديد مزايا ومساوئ استخدام كلاً منها ضمن جهاز المحاكاة الشمسية، حيث كان اختلاف عمل المصابيح عن بعضها بعدد من النقاط الأساسية: الطيف المتباين، توزيع الأشعة، الكفاءة والقضايا التشغيلية الخاصة لكل نوع من المصابيح.

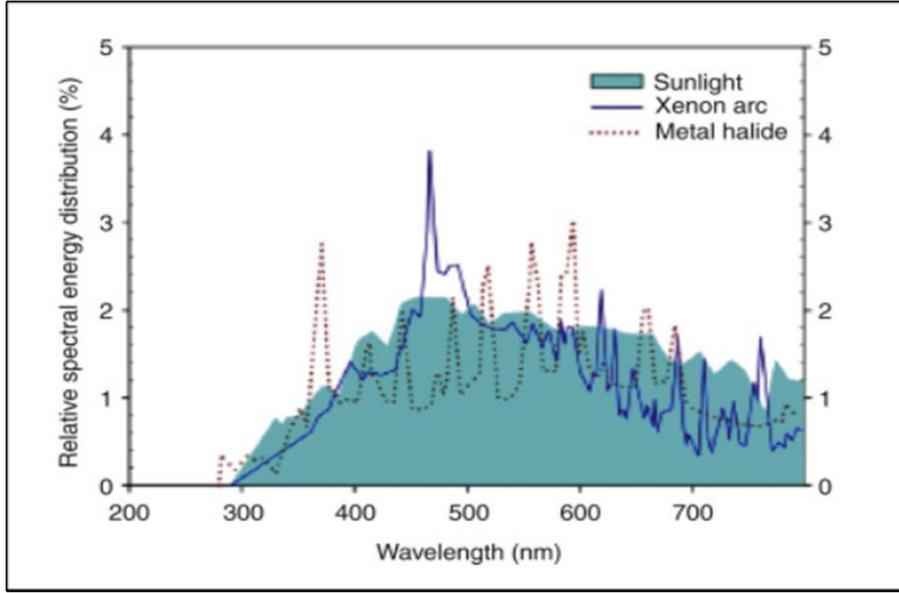
ويعد اختيار نوع المصباح النهائي هو الجزء الأهم من التخطيط النهائي لتصميم المحاكى المطلوب.

تبين الأشكال (2,3) مقارنة بين الكثافة الضوئية النسبية للشمس مع أنواع المصابيح المختلفة مقابل المحتوى الطيفي لكل مصدر ضوئي.



الشكل (2): الكثافة النسبية لمصدر الضوء مقابل المحتوى الطيفي.

يشير الشريط الموجود في الأسفل إلى النطاق التقريبي لطول الموجة المرئي للإنسان.



الشكل (3): الكثافة النسبية لمصباح الزينون والميتال هاليد مقابل المحتوى الطيفي.

مصباح Xenon arc lamp:

نلاحظ من الشكلين (2,3) أن مصباح قوس الزينون هو الخيار الأول لمصدر الضوء

بسبب خصائصه الطيفية المستقرة في توفير استمرارية ممتازة في الأشعة فوق البنفسجية وعبر النطاق المرئي. ميزة أخرى لمصباح الزينون هي أن التباين في الطاقة لا يسبب أي تحول ملموس في توازنه الطيفي. هذا يقلل من متطلبات استقرار التيار الكهربائي [22]. علاوة على ذلك، يمكن أن توفر مصابيح الزينون ذات القوس القصير والضغط العالي مصدرًا أكثر إشراقًا من مصادر الضوء الأخرى، وهو أمر مطلوب لإنتاج شعاع ضوئي عالي الكثافة متوازي [23]. ومع ذلك، فإن مصابيح الزينون لها عيوبها الكامنة التي تحد من تطبيقها في جميع أنواع المحاكاة الشمسية:

- يتطلب مصباح الزينون مصدر طاقة أكثر تعقيدًا وباهظ التكلفة مما يجعله أعلى مصدر إضاءة تجاري تقريبًا.
 - يبلغ ضغط غاز الزينون في مصباح الزينون حوالي 10 بار ويمكن أن يصل إلى 40 بار أثناء تشغيله، مما يسبب مخاطر أمنية عالية.
 - تتحول قمع الإشعاع بعيدًا قليلًا عن الأشعة فوق البنفسجية إلى الأشعة تحت الحمراء مع تقدم عمر المصباح [22]، [23]، [24].
- نظرًا لهذه المزايا والعيوب، في تصميم أجهزة محاكاة الطاقة الشمسية الحديثة التي لها متطلبات طيف وكثافة منخفضة، فإن مصباح الكوارتز تنغستن هالوجين ومصباح القوس الهاليد المعدني متفوقان على مصباح الزينون. خلاف ذلك، سيكون مصباح الزينون هو الخيار الأول.

مصباح قوس هاليد المعدني Metal Halide arc lamp :

نلاحظ من الشكل (3) أن مصابيح الهاليد تنتج طيفاً متطابقاً بشكل كبير مع ضوء الشمس الطبيعي في منطقة الأشعة فوق البنفسجية ومناطق الضوء المرئي. كما تتمتع هذه المصابيح بفعالية عالية في الإضاءة والتي تزيد عن 90 Lumen/Watt، والتوازن الجيد في الصفات الطيفية، بالإضافة إلى العمر الطويل (> 1000 ساعة) والتكلفة النسبية غير المكلفة [25]. ولكن هناك عيب رئيسي لهذا المصباح وهو انخفاض جودة التوازي للحزم الإشعاعية مما يجعله مستخدماً في المحاكاة الكهروضوئية والشمسية التي تحتاج فقط لإضاءة ثابتة وخصائص طيفية أقل دقة [23]، [26].

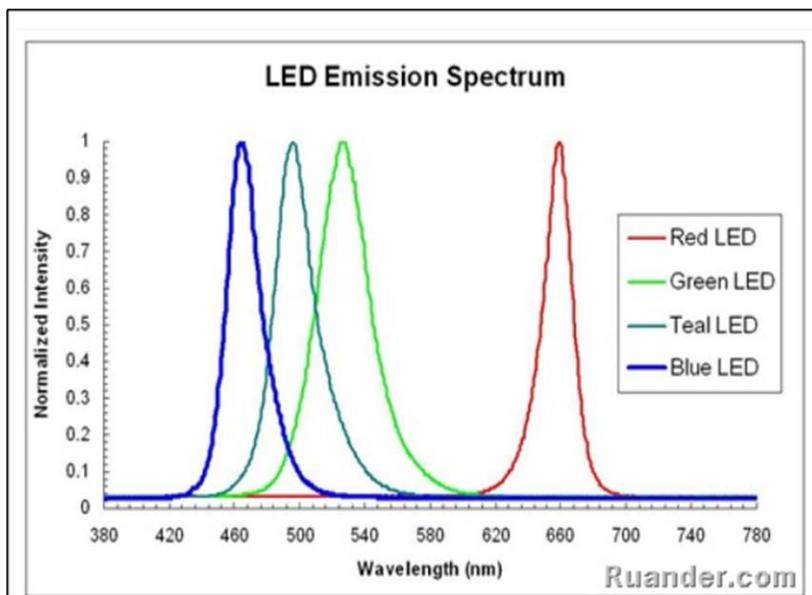
الصمامات الثنائية الباعثة للضوء LEDlight-emitting diodes :

يظهر الشكل (2) أن هذا النوع يملك طيف خرج أحادي اللون (أحمر، أخضر، أزرق) ضيق نسبياً كما يبين في الشكل (4) باستثناء مصابيح LED البيضاء. وبحسب الدراسات فإن هذه الصمامات تقدم الوعد بإنتاج الطاقة بكفاءة عالية لأجهزة المحاكاة الشمسية الاصطناعية في المستقبل. تتمتع مصابيح LED بالعديد من المزايا مقارنة بمصادر الإضاءة التقليدية المستخدمة في المحاكيات الشمسية:

- يمكن التحكم في مصابيح LED بسرعة كبيرة في غضون ميكروثانية وتشغيلها بشكل ثابت عند شدة خرج ضوء واحدة بشكل مستمر لفترة طويلة.
- تتوفر بمجموعة متنوعة من الألوان والأطوال الموجية، مما يعني أن الجمع بين عدد من الألوان المطلوبة يمكن الحصول على AM0 أو AM1.5 أو AM2 أو طيف خاص آخر.
- مع تطوير مصابيح LED عالية الطاقة، تتوفر مصابيح LED ذات كثافة إضاءة 1000 W/m^2 ، ومن المتوقع أن تكون مصابيح LED ذات كثافة أعلى في المستقبل.
- تتمتع مصابيح LED بعمر طويل جداً يصل إلى 50000 إلى 100000 ساعة بشكل عام، مما يعني أنها لا تعوض فقط التكلفة العالية لكل شدة إضاءة ولكن أيضاً تقلل من تكلفة الصيانة إلى الحد الأدنى.
- أكثر إحكاماً وتوفير الطاقة، على عكس المحاكيات الشمسية من نوع مصابيح الزينون ذات الحجم الكبير.
- يمكن تصميم جهاز محاكاة الطاقة الشمسية LED بشكل مضغوط للغاية بسبب مصدر الضوء العالي الكفاءة، والأجهزة الإلكترونية الأقل وبدون مكثف حجم كبير [27]، [28]، [29].

ومع ذلك، فإن LEDs لها أيضاً عيوبها الكامنة: الأول هو أن طاقة خرج ضوء LEDs وكفاءتها وعمرها تنخفض بشكل حساس مع ارتفاع درجة حرارة التشغيل. لذا فإن نظام التبريد الجيد ضروري، لكن هذا يقلل من كفاءة الإخراج أيضاً. كذلك، لا تزال شدة

الضوء لمصابيح LED منخفضة جداً لتصميم محاكاة الطاقة الشمسية. باختصار، تظهر مزايا مصابيح LED أنها تفوق عيوبها وتجعلها مصدر ضوء مرشحاً مثاليًا لتصميم محاكاة الطاقة الشمسية المتقدمة في المستقبل، على الأقل لمحاكاة الطاقة الشمسية من النوع غير المركز.



الشكل (4): يبين طيف الانبعاث لألوان الصمامات الثنائية الباعثة للضوء.

مصابيح الكوارتز الهالوجين التنجستن QTH quartz tungsten halogen lamps :

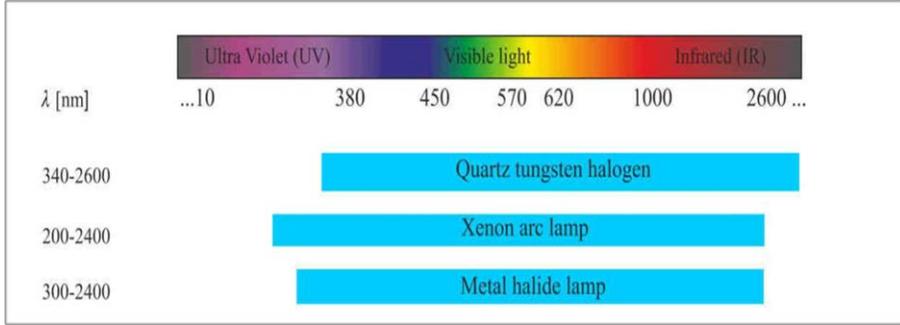
يظهر الشكل (2) تشابه كبير بين الخصائص الطيفية لمصابيح الكوارتز الهالوجين التنجستن مع ضوء الشمس الطبيعي، حيث أطيفها تطابق بشكل وثيق للغاية إشعاع الجسم الأسود. وتمتاز هذه المصابيح بعدة مميزات [25]:

- تكون ذات درجة حرارة ألوان أقل من درجة حرارة الشمس.
- متوفرة بشكل غير مكلف (أرخص بكثير من مصابيح قوس الزينون والميتال هاليد).
- تمتاز بسهولة الصيانة.
- الضوء الناتج عنها ذو اتساق ممتاز.

لذا تكون هذه المصابيح شائعة على نطاق واسع للاستخدام التجاري، الإضاءة المحلية، وصناعة السيارات، المحاكيات الشمسية وخاصة ذات متطلبات الطيف الأقل (محاكاة الطاقة الشمسية لاختبار المجمعات والألواح الشمسية).

مصباح زينون الزئبقي Mercury xenon lamp:

إن مصابيح الزينون الزئبقية هي نوعاً آخر من مصادر الضوء المستخدمة على نطاق واسع في المحاكيات الشمسية الفضائية المبكرة إلا أن استخدام المحاكي الشمسي بمصباح الزينون الزئبقي يمكن أن يؤدي إلى انفجار المصباح وانتشار بخار الزئبق، لذلك غالباً يتم استبدال مصابيح الزينون الزئبقية بمصباح الزينون القوسي كخيار أول لمصدر الضوء [30].



الشكل (5): نطاق الطيف المنبعث لثلاثة أنواع من المصابيح المعروضة: هالوجين التنجستن كوارتز والهاليد المعدنية ومصباح قوس الزينون.

من خلال الدراسة السابقة، وبالمقارنة بين مصابيح الزينون ومصابيح الهاليد المعدنية والهالوجين التنجستن وLEDs، نجد أن هالوجين التنجستن الكوارتز يمكن استخدامها في تصميم المحاكي التجريبي نظراً لخصائصها الأنسب وتوفرها محلياً وسعرها المناسب. في الجدول (2) التالي يتم عرض مواصفات مصابيح الهالوجين تنجستن المتوفرة عالمياً.

الجدول (2): مواصفات مصابيح الهالوجين تنغستن حسب استطاعتها.

Double Ended Tungsten Halogen Lamps					
Watts	Bulb	Lighted Length (in)	Life	Lumens	Lumens/Watt
300	T2 $\frac{1}{2}$	2 $\frac{1}{8}$	2000	6000	20
300	T4	5 $\frac{1}{8}$	2500	5000	16.7
400	T4	5 $\frac{1}{8}$	2000	7500	18.8
500	T3	2	2600	10000	20
1000	T3	6 $\frac{3}{4}$	2000	21500	21.5
1000	T6	1 $\frac{1}{8}$	2000	22000	22
1500	T3	6 $\frac{3}{4}$	3000	29000	19.3

Single Ended Tungsten Halogen Lamps					
Watts	Bulb	Lighted Length (in)	Life	Lumens	Lumens/Watt
100	T4	1 $\frac{1}{8}$	1000	1900	19
150	T4	1 $\frac{1}{2}$	2000	2600	17.3
250	T4	1 $\frac{3}{8}$	2000	5000	20
500	T4	2	2000	9500	19

وعند إجراء التجارب باستخدام مقياس شدة الإشعاع الضوئي Lux meter على أنواع مختلفة من المصابيح المتوفرة وبعدها ثابت عن المقياس (23 cm) كانت قيمة الإشعاع التي حصلنا عليها من مصابيح الهالوجين هي الأفضل مقارنة مع مصابيح الفلوريسانت، والمصابيح المدمجة، والمصباح الأحمر Ultra violet، وLED وكذلك حساسية مقياس الأمبير عند توجيه هذا الإشعاع على لوح كهروضوئي باستطاعة 30 W كانت أيضاً الأعلى بالنسبة لمصابيح الهالوجين، وتم الحصول على النتائج التالية:

- مصباح هالوجين تنغستن وهاج نوع تجاري باستطاعة 500 W أعطى كثافة إشعاع تساوي 11000 Lux ولكن قيمة تحسس مقياس الأمبير عند توجيه هذا الإشعاع على لوح كهروضوئي باستطاعة 30 W كانت 400 mA.
- مصباح هالوجين تنغستن وهاج نوع جيد باستطاعة 500 W أعطى كثافة إشعاع

تساوي 13000 Lux ولكن قيمة تحسس مقياس الأمبير عند توجيه هذا الإشعاع على لوح كهروضوئي باستطاعة 30 W كانت 700 mA. حسب القيم السابقة فإن استخدام مصباح الهالوجين 500 W من النوع الجيد هو الأنسب من حيث قيمة الإشعاع العالية والمناسبة لغرض الاختبار، ومن حيث قراءة مقياس الأمبير الناتجة عن هذا الإشعاع لذلك تم اعتمادها في تصميم المحاكى الشمسي. من أجل الحصول على الإشعاع المناسب لدراسة اللوح الكهروضوئي 30 Watt وبالتالي للوصول لقيمة مناسبة لتيار خرج اللوح قمنا بزيادة عدد المصابيح فكان الأنسب استخدام ستة مصابيح من نفس النوع، وكذلك فإن اختيار طريقة توضع هذه المصابيح ضمن الكيبين تم بعد إجراء عدة مناورات للحصول على أكبر قيمة للتيار الناتج عن اللوح الكهروضوئي. وفي الشكل (6) نوضح كيفية اتخاذ وضعية المصابيح الأمثلية لهذه التجربة.



الشكل (6): يبين الشكل الأولي لتوضع مصابيح الهالوجين في النموذج.

كانت قيمة الإشعاع بواسطة Lux meter لستة مصابيح هالوجين ذات نوع جيد تساوي

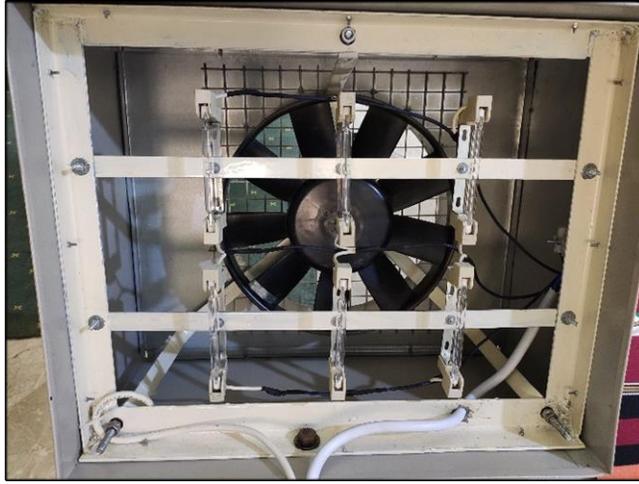
(68000 Lux) وباستخدام العلاقة (1) يتم تحويل الواحدة:

$$0.0079 * \text{Lux} = \text{W/m}^2 \quad (1)$$

$$68000 \text{ Lux} * 0.0079 = 537.2 \text{ W/m}^2$$

• تصميم الكبين الحديدي:

تم تصميم الكبين الحديدي ليحتوي المصدر الضوئي أساساً وكذلك بقية العناصر المهمة. كذلك، تم تحديد الأبعاد المناسبة للكبين كما يلي (طول 55 cm، عرض 45 cm، ارتفاع 30 cm). يثبت جسر المصابيح ضمنه ويوضع على عمق 5 cm فيساعد ذلك بتركيز الاشعاع الناتج عن المصابيح وتجميعه. يوضح الشكل (7) الكبين وجسر المصابيح المثبت ضمنه.



الشكل (7): يبين محتوى كبين الإضاءة الداخلي.

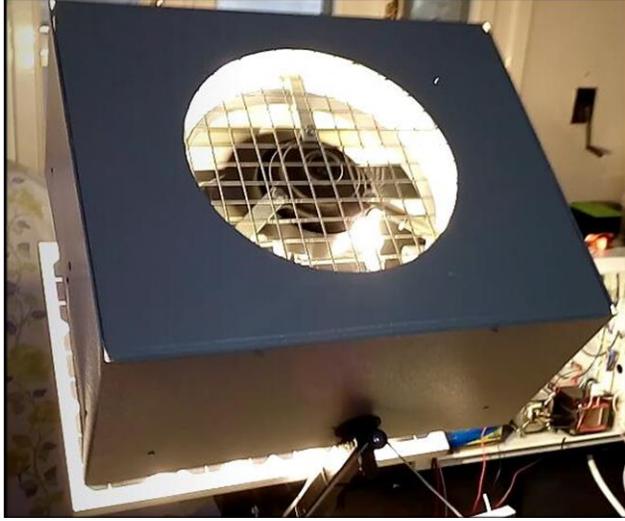
تتم تغذية كبين الإضاءة من الشبكة العامة AC-220 V لتقوم بسحب تياراً ما يقارب 15A.

ونظراً لكمية الاشعاع الساقط على اللوح المقابل للكبين لابد من الأخذ بعين الاعتبار قيمة درجة حرارة النقطة السوداء للخلايا الكهروضوئية (Black-Hotspot) لذلك، تم وضع حساس خاص لقياس درجة الحرارة بحيث تم تثبيته على الوجه الخلفي للوح وفي منتصفه، كما تم تركيب مروحة مناسبة للتبريد ضمن الكبين الحديدي.

مواصفات مروحة التبريد:

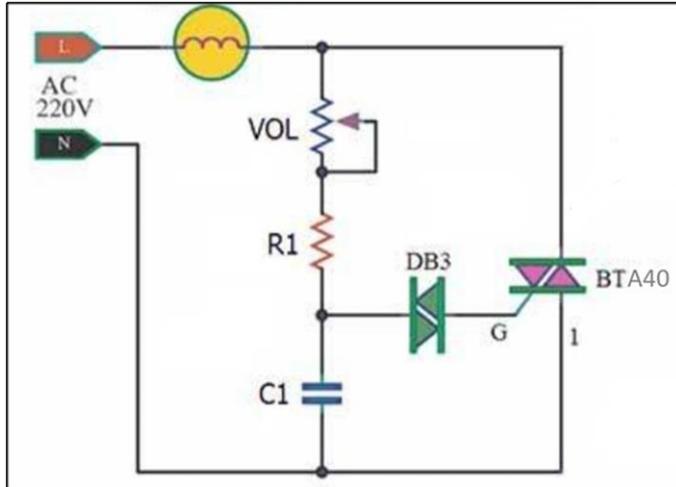
مروحة تيار مستمر سريعة وكبيرة 12 V وباستطاعة 120 W تستجر حوالي 8 A تتم تغذيتها من محول خاص 220/13.7 V متناوب وباستخدام جسر التقويم مع المبرد يتم تحويل التيار إلى مستمر. يوضح الشكل (8) توضع مروحة التبريد ضمن الكبين وتتم

تغطيتها بشبك لحماية المستخدم.



الشكل (8): يبين مروحة التبريد مع شبك الحماية.

ومع الحاجة لتغيير شدة الإشعاع الضوئي الساقط على اللوح الكهروضوئي المدروس تم ربط مجموعة المصابيح إلى دائرة مغير الشدة (Dimmer circuit) لقيادة المصابيح الستة عن طريق التحكم בזاوية القذح يتم تغيير قيمة الجهد وبذلك شدة الإضاءة، كما يتم إضافة مبرد لهذه الدارة نظراً لقيمة تيار الإضاءة العالية. يوضح الشكل (9) دائرة عمل ال Dimmer ومكوناتها الأساسية.



الشكل (9): يبين الدارة الأساسية لمغير الشدة الضوئية.

تتألف الدارة من تريك استطاعي بتيار عالي 40 A يتم التحكم בזاوية القذح له عن طريق الدياك والمقاومة المتغيرة لكلا الموجتين الموجب والسالب ليتم بذلك التحكم بشدة الإضاءة تدريجياً.

تطبيقات البحث ونتائجه:

تم تصميم نموذج مصغر لملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية ومحاكاة الحالات الممكنة لتغير التوضع والزوايا بين اللوح الكهروضوئي المستخدم والمحاكي الشمسي كما في الشكل (10) التالي:



الشكل (10): يبين الشكل العام للنموذج المصغر.

الأجزاء الأساسية:

1. لوح الخلايا الشمسية.
2. منظم الشحن PWM.
3. كيبين الإضاءة الحديدي.
4. القاعدة الحديدي.

5. محرك DC مع ذراع.

6. الواجهة التفاعلية للنموذج.

وفي هذا التصميم كان كيبين الإضاءة المصمم هو العنصر الأساسي الذي ساهم في الوصول لغاية النموذج المصمم، واستطعنا من خلاله ومن خلال مكوناته البسيطة المتوفرة الحصول على إشعاع ضوئي مناسب للوصول إلى استرجار التيار الاسمي من اللوح الكهروضوئي النموذجي المستخدم.

ولهذا التصميم العديد من درجات الحرية بحيث يمكن من استيفاء جميع الحالات الممكنة لتوضع اللوح بالنسبة لمصدر الإشعاع الضوئي:

1- تغيير بعد الكيبين عن اللوح.

2- تغيير زاوية ميل الكيبين عن اللوح على محور Y.

3- تغيير اتجاه الكيبين بتثبيت اللوح.

4- حركة اللوح الكهروضوئي على محور X.

5- حركة اللوح الكهروضوئي على محور Y بتثبيت الكيبين.

المواصفات الاسمية للوح الكهروضوئي المدروس:

$W_{mp} = 30 W$ الاستطاعة عند نقطة الاستطاعة العظمى.

$V_{mp} = 17.3 V$ الجهد عند نقطة الاستطاعة العظمى.

$I_{mp} = 1.73 A$ التيار عند نقطة الاستطاعة العظمى.

$V_{OC} = 21.5 V$ جهد الدارة المفتوحة.

$I_{SC} = 1.86 A$ تيار الدارة المقصورة.

$T -40 C^{\circ}$ to $+85 C^{\circ}$ درجات الحرارة المناسبة للتشغيل.

Power tolerance 0/+5% القيم الاحتياطية المسموحة للعمل ضمنها.

فيما يلي نعرض دراسة الحالة الأعظمية للاستطاعة الناتجة:

أولاً: المحاكى الشمسي عمودياً على اللوح الكهروضوئي وعلى بعد 23 cm منه ومغير

الشدة الضوئية Dimmer مضبوطاً على القيمة العظمى

من أجل هذه الظروف المحيطة كانت قيمة الإشعاع الضوئي الساقط على اللوح

الكهروضوئي تبلغ حسب العلاقة (1)

$$68000 \text{ Lux} * 0.0079 = 537.2 \text{ W/m}^2$$

وكانت قيمة خرج اللوح الكهروضوئي بالنسبة للجهد والتيار وتيار القصر

$$V = 13 \text{ V}$$

$$I = 1.27 \text{ A}$$

$$I_{sc}=1.6 \text{ A}$$

وكذلك قيمة حساس الحرارة للوح الكهروضوئي كانت 80°C

وبذلك تحسب استطاعة الخرج من العلاقة (2)

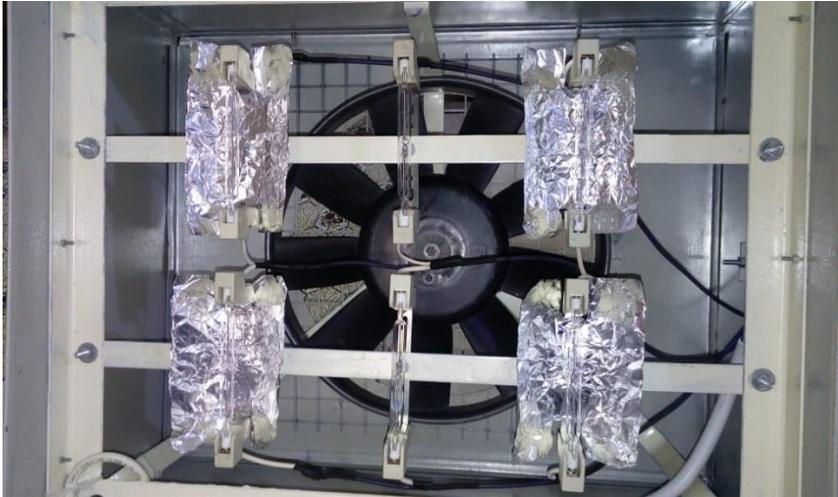
$$P=V*I \quad (2)$$

$$P_{out} = 13 * 1.27 = 16.51 \text{ W}$$

ثانياً: المحاكى الشمسي عمودياً على اللوح الكهروضوئي وعلى بعد 23 cm منه ومغير

الشدة الضوئية Dimmer مضبوطاً على القيمة العظمى مع وجود عواكس

تمت في هذه الحالة إضافة عواكس من الألمنيوم لأربع مصابيح من كبين الإضاءة بهدف زيادة شدة الإشعاع الناتج حيث تم وضع شرائح من الألمنيوم خلف مصابيح الزوايا الأربعة مع مراعاة عدم وضع هذه العواكس للمصابيح الواقعة في الوسط أخذين بعين الاعتبار المحافظة على درجة الحرارة في منتصف اللوح المدروس والتي تتركز فيها الشدة الضوئية وبالتالي الحرارة، يبين الشكل (11) توضع العواكس ضمن الكبين:



الشكل (11): يبين عواكس الألمنيوم خلف المصابيح.

فكانت النتيجة ارتفاع في قيمة الإشعاع لتبلغ حسب العلاقة (1)

$$78000 \text{ Lux} * 0.0079 = 616.2 \text{ W/m}^2$$

وكانت قيمة خرج اللوح الكهروضوئي بالنسبة بالنسبة للجهد والتيار والتيار القصر

$$V = 13.4 \text{ V}$$

$$I = 1.78 \text{ A}$$

$$I_{sc} = 2 \text{ A}$$

وكذلك قيمة حساس الحرارة للوح الكهروضوئي كانت 83°C

وبذلك تحسب استطاعة الخرج من العلاقة (2)

$$P_{out} = 13.4 * 1.78 = 23.852 \text{ W}$$

حساب مردود عمل اللوح الكهروضوئي لحالة الاستطاعة العظمى بوجود العواكس:

أبعاد اللوح المستخدم في النموذج ($0.4 \text{ m} * 0.52 \text{ m}$) فتكون مساحة السطح للوح:

$$S = L * W$$

$$S = 0.4 \text{ m} * 0.52 \text{ m} = 0.208 \text{ m}^2$$

وإن قيمة الإشعاع في هذه الحالة تساوي حسب العلاقة (1):

$$0.0079 * 78000 \text{ Lux} = 616.2 \text{ W/m}^2$$

تساوي: فتكون قيمة الاستطاعة الساقطة على اللوح

الاستطاعة P_{in} = قيمة الإشعاع الساقط على اللوح * مساحة اللوح

$$P_{in} = 616.2 \text{ W/m}^2 * 0.208 \text{ m}^2 = 128.16 \text{ W}$$

قيمة الاستطاعة الخارجة من اللوح في هذه الحالة:

$$P_{out} = V * I = 13.4 \text{ V} * 1.78 \text{ A} = 23.852 \text{ W}$$

قيمة المردود:

$$\text{Efficiency} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{23.852}{128.16} = 0.18$$

وقد تمت مقارنة القيم الناتجة عن المحاكى المصنع مع قيم الإشعاع المقاس في محطة

الرصد (مركز البيئة) للإشعاع الشمسي الحقيقي لمدينة حلب فكانت القيم منطقية

ومناسبة بالنسبة لمحاكي يعمل تحت الظروف المخبرية وفي جميع الأوقات ويمكن زيادة

قيمة الإشعاع بالتقريب أو زيادة عدد العواكس ولكن في حالة اللوح المعتمد للدراسة فإن

القيم الناتجة كافية والجدول (3) يبين نتائج المقارنة:

الجدول (3): مقارنة قيمة الاشعاع لحالات متعددة.

أعلى قيمة للإشعاع W/m ²	أعلى قيمة للإشعاع Lux	الشهر	المصدر
1050	132900	أب	محطة الرصد الساعة 12.30 ظهراً
980	124000	تموز	محطة الرصد الساعة 12.30 ظهراً
948	120000	تموز	تجريبي باستخدام مقياس Lux meter للأشعة الشمسية المباشرة على السطح الساعة 12.30 ظهراً
700	88600		تجريبي باستخدام مقياس Lux meter لجهاز المحاكاة عند القيمة العظمى ويبعد 20 cm عن اللوح المدروس
616	78000		تجريبي باستخدام مقياس Lux meter لجهاز المحاكاة عند القيمة العظمى ويبعد 23 cm عن اللوح المدروس مع إضافة عواكس
537	68000		تجريبي باستخدام مقياس Lux meter لجهاز المحاكاة عند القيمة العظمى ويبعد 23 cm عن اللوح المدروس

مناقشة نتائج البحث:

- 1- تم بواسطة هذا النموذج المصغر ومن خلال الإشعاع الناتج عن كبين الإضاءة (مصابيح الهالوجين تتغستين) توليد قيمة تيار من اللوح الكهروضوئي المستخدم مساوية لقيمة التيار الاسمي.
- 2- تم الحصول على مردود عمل لهذا النموذج بقيمة جيدة ومناسبة.
- 3- تم الحصول على حالات خاصة حيث أمكن الوصول لقيمة إشعاع أعلى وذلك إما بتقريب الكبين من اللوح أو بزيادة عدد العواكس خلف المصابيح داخل الكبين ولكن هذه الحالة غير مرغوبة للعمل بالنسبة للوح الكهروضوئي المدروس، فعند تقريب الكبين من اللوح (البعد 20 cm) تم استرجار قيمة تيار أعلى من التيار الاسمي حيث وصلت قيمة التيار إلى 2 A وقيمة حساس الحرارة هنا تجاوزت 92 C° وقيمة

تيار القصر 2.2 A وحسب الشروط والقيم الاحتياطية لا يجب تجاوز هذه القيم أو العمل عندها لفترة معينة حرصاً على سلامة اللوح الكهروضوئي.

التوصيات:

- 1- إضافة أطيف أخرى من مصادر الضوء (ضوء زينون خاص، اللون الأحمر، اللون الأصفر، اللون الأخضر ومصادر الأشعة تحت الحمراء....) التي تمتلك أطوال موجات مختلفة لنحصل على اشعاع أقرب ما يمكن لأشعة الشمس الطبيعية.
- 2- الاستعاضة عن المروحة ذات الصوت العالي بالتبريد عن طريق الماء بطريقة فنية معينة (مضخة مع حاجز مائي ملاصق للواجهة) أو أي طريقة تبريد أخرى.
- 3- إضافة حساس تحليل الطيف الضوئي لقراءة حزمة الطيف الضوئي الساقط على اللوح.
- 4- العمل لتعديل شكل الكبين لشكل مخروطي بسطح عاكس كامل وبذلك زيادة في تركيز الإشعاع الصادر عن المصدر الضوئي وتقليل بذلك استطاعة المصدر الضوئي ولكن هذا يحتاج إلى كلفة إضافية كبيرة وقواعد إضافية لثبيت مروحة التبريد كما يحتاج لحجم أكبر.

المراجع:

- [1] ARMED SERVICES TECHNICAL INFORMATION AGENCY, January 1963 - **Solar Energy Measurement Techniques**. Technical Documentary Report ASD-TDR-62-882.
- [2] S. M. NEUDER, 1970- **Spectral Modification for Solar Simulation**. Applied Optics 9, pp. 1014-1018.
- [3] U. C. PERNISZ, 1982-1983 - **Development of a Standard Test Method for Measuring Photovoltaic Cell Performance**. Solar Cells 7, pp. 203-208.
- [4] H. BRANDHORST, J. HICKEY, H. CURTIS, E. RALPH, 1975- **Interim Solar Cell Testing Procedures for Terrestrial Applications**. NASA TM X-71771.
- [5] ERDA/NASA, 1977- **Terrestrial Photovoltaic Measurement Procedures**. NASA TM-73702.
- [6] Commission of the European Communities, 1979- **Standard Procedures for Terrestrial Photovoltaic Performance Measurements**. ISBN 92-825-1484-6.
- [7] H. A. SCHAFFT, 1982-1983 - **Measurements for Commercial Photovoltaics: A Status report**. Solar Cells 7, pp. 23-46.
- [8] R. J. MATSON, K. A. EMERY AND R. E. BIRD, 1984- **Terrestrial Solar Spectra, Solar Simulation and Solar Cell Short-Circuit Current Calibration: A Review**. Solar Cells 11, 105-145.
- [9] S. J. HOGAN, 1986- **Status of IEC, ASTM, and IEEE Photovoltaic Standards**. Solar Cells 18, pp. 327-333.
- [10] E. L. RALPH, 1982-1983- **Photovoltaics Measurement Equipment Needs: The View of a Prospective Supplier**. Solar Cells7, pp. 55-60.
- [11] K. A. EMERY, 1986- **Solar Simulators and I-V Measurement Methods**. Solar Cells18, pp. 251-260.

- [12] R. L. MUELLER, 1993- **The Large Area Pulsed Solar Simulator (LAPSS)**. JPL Report, JPL Publication 93-22.
- [13] T. W. CANNON, 1998- **Spectral Measurements of Pulse Solar Simulators**. NREL Report, NREL/CP-560-25732.
- [14] L. C. KILMER, 1995- **Design of a More Accurate, Higher Fidelity, Dual-Source Air Mass Zero Solar Simulator**. Aerospace Report, TR-94(4524)-1.
- [15] P. JENKINS, D. SCHEIMAN, D. SNYDER - **Design and Performance of a Triple Source Air Mass Zero Solar Simulator**. 18th Space Photovoltaic Research and Technology Conference, NASA/CP-2005-213431, pp. 134-138.
- [16] M. BLISS, T. R. BETTS, R. GOTTSCHALG, 2008-**Advantages in Using LEDs as the Main Light Source in Solar Simulators for Measuring PV Device Characteristics**. Proc. of SPIE, Vol. 704807.
- [17] S. H. JANG, M. W. SHIN, 2010- **Fabrication and Thermal Optimization of LED Solar Cell Simulator**. Current Applied Physics 10, pp. 537-539.
- [18] ASTM International - ASTM E927-04, 2010- **Specification for Solar Simulation for Photovoltaic Testing**.
- [19] ASTM G173-03, 2008 -**Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37 Tilted Surface**.
- [20] P. KRUSI and R. SCHMID, 1983-**The CSI 1000W Lamp as Source for Solar Radiation Simulation**. Solar Energy 30, pp. 455-462.
- [21] R. WINSTON, J. C. MINANO, P. BENITEZ, 2005-**Nonimaging Optics**. Elsevier Academic Press.
- [22] D. BICKLER, 1962- **The Simulation of Solar Radiation**. Solar Energy 6, pp. 64-68.

- [23] R. J. MATSON, K. A. EMERY AND R. E. BIRD, 1984 - **Terrestrial Solar Spectra, Solar Simulation and Solar Cell Short-Circuit Current Calibration: A Review**. Solar Cells 11, pp 105-145.
- [24] D. S. CODD, A. CARLSON, J. REES, A. H. SLOCUM, 2010- **A Low Cost High Flux Solar Simulator**. Solar Energy 84, pp. 2202-2212.
- [25] E. J. G. BEESON, 1978- **The CSI Lamp as a Source of Radiation for Solar Simulation**. Lighting Research and Technology 10, pp. 164-166.
- [26] P. KRUSI and R. SCHMID, 1983- **The CSI 1000W Lamp as Source for Solar Radiation Simulation**. Solar Energy 30, pp. 455-462.
- [27] M. BLISS, T. R. BETTS, R. GOTTSCHALG, 2008- **Advantages in Using LEDs as the Main Light Source in Solar Simulators for Measuring PV Device Characteristics**. Proc. of SPIE, Vol. 704807.
- [28] S. KOHRAKU, K. KUROKAWA, 2006- **A Fundamental Experiment for Discrete-Wavelength LED Solar Simulator**. Solar Energy Materials & Solar Cells 90, pp. 3364-3370.
- [29] A. M. BAZZI, Z. KLEIN, M. Sweeney, et al., 2012 -**Solid- State Solar Simulator**. IEEE Transactions on Industry Applications 48, pp. 1195-1202.
- [30] G. G. GORANSON, 1965 -**Comments on the Operation of the JPL 25-ft Space Simulator**. Technical Report No.32-885.
- [31] Erkata Yandri , 2018- **Uniformity characteristic and calibration of simple low cost compact halogen solar simulator for indoor experiments**. Indonesia.
- [32] Rahmat Awaludin Salam, Muhammad Miftahul , MunirThariq Warsahemas, Casmika Saputra, Hamzah Latief and Khairurrijal Khairurrijal , 2018 - **A simple solar simulator with highly stable controlled irradiance for solar panel characterization**.

