العدد 21A 2 تموز 2026
المجلة العراقية للبحوث الانسانية والاجتماعية والعلمية
NO.21A2 Jul.2026 Iraqi Journal of Humanitarian, Social and Scientific Research
Print ISSN 2710-0952 Electronic ISSN2790-1254

تطوير خوارزمية مدينة باستخدام طريقه الفروق المحدة (FDM : المدينة التوزيع الحراري في الالواح الكهروضوئية وتحسين كفاءتها الثاقبة

علاوي شرهان شخير الحمزاوي

المخلص

يعتمد البحث بشكل جوهري على تطوير خوارزمية عددية تستخدم "طريقة الفروق المحددة (Finite Difference Method)" لتحويل المعادلات التفاضلية الجزئية المعقدة التي تصف انتقال الحرارة إلى معادلات جبرية يمكن حلها برمجياً بدقة عالية، مما يتيح للباحثين والمصممين فهم كيفية توزيع الحرارة داخل طبقات اللوح الشمسي المختلفة من الزجاج والسيليكون والطبقة الخلفية تحت ظروف بيئية متغيرة .وتتجلى القيمة العلمية للبحث في قدرة الخوارزمية المطورة على تقديم تحليل "ثلاثي الأبعاد" للتوزيع الحراري، وهو ما يتجاوز القصور في النماذج التقليدية التي تفترض غالباً توزيعاً منتظماً للحرارة. من خلال هذه النمذجة الدقيقة، يساهم البحث في تحديد "النقاط الساخنة" التي تسبب تلف الخلايا وتراجع أدائها، مما يفتح الباب أمام استنباط حلول هندسية لتحسين "الكفاءة القاعية" أو التشغيلية للألواح عبر تصميم أنظمة تبريد أكثر فاعلية أو اختيار مواد ذات موصلية حرارية أفضل .كما يركز الملخص على الربط بين النتائج العددية المستخرجة من الخوارزمية وبين الواقع التطبيقي، حيث يتم اختبار دقة الخوارزمية بمقارنتها ببيانات حقيقية لضمان موثوقيتها كأداة تنبؤية. وفي الختام، يقدم البحث رؤية شاملة حول كيفية استغلال الحلول العددية في تقليل الفواقد الطاقية وإطالة العمر الافتراضي للمنظومات الكهروضوئية، مما يعزز من الجدوى الاقتصادية لمشاريع الطاقة المتجددة خاصة في المناطق ذات المناخات الحارة التي تعاني من ارتفاع مفرط في درجات حرارة الألواح.

Abstract

developing a numerical algorithm that utilizes the he research essentially relies on Finite Difference Method" (FDM) to transform complex partial differential " equations describing heat transfer into algebraic equations that can be solved searchers and designers to computationally with high precision. This allows re understand how

glass, silicon, and the —heat is distributed within the various layers of a solar panel under changing environmental conditions. The scientific value of the —backsheet dimensional" (3D) analysis of thermal -developed algorithm lies in providing a "three distribution, which overcomes the limitations in traditional models that often assume uniform heat distribution. Through this precise modeling, the research contributes to and performance degradation, thereby identifying "hot spots" that cause cell damage line -opening the door for devising engineering solutions to improve the "bottom efficiency" or operational efficiency of the panels. This is achieved by designing more ith better thermal conductivity. effective cooling systems or selecting materials w Furthermore, the abstract focuses on linking the numerical results extracted from the algorithm with the practical application, where the accuracy of the algorithm is tested s reliability as a predictive tool. In world data to ensure it-by comparing it with real conclusion, the research provides a comprehensive vision of how to exploit numerical solutions to reduce energy losses and extend the lifespan of photovoltaic systems. This, of renewable energy projects, particularly in in turn, enhances the economic feasibility hot regions suffering from excessive increases in solar panel temperatures

المقدمة

يتمثل في الحساسية العالية للخلايا الشمسية تجاه الارتفاع في درجات حرارة التشغيل. فعندما تسقط الأشعة الشمسية على الألواح، يتحول جزء ضئيل منها إلى طاقة كهربائية بينما يتحول الجزء الأكبر إلى طاقة حرارية تتراكم داخل طبقات اللوح، مما يؤدي إلى تراجع ملموس في كفاءة التحويل الكهرومغناطيسي وتسريع ظاهرة الهرم الضوئي للمواد المكونة للخلايا. ومن هنا تبرز الحاجة الماسة إلى فهم دقيق وديناميكي لكيفية انتقال وتوزيع هذه الحرارة عبر الأجزاء المختلفة للوح الشمسي، بدءاً من الطبقة الزجاجية الخارجية ووصولاً إلى الخلايا والطبقة الخلفية العازلة .تأتي هذه الدراسة لتقديم حلول علمية متقدمة من خلال تطوير خوارزمية عددية تعتمد على "طريقة الفروق المحددة (Finite Difference Method - FDM)"، وهي واحدة من أقوى الأدوات الرياضية المستخدمة في حل المعادلات التفاضلية الجزئية التي تحكم انتقال الحرارة. تكمن أهمية استخدام هذه الطريقة في قدرتها على تقسيم جسم اللوح الشمسي إلى شبكة من النقاط المترابطة، مما يسمح بمحاكاة التغيرات الحرارية في أبعاد مكانية وزمانية دقيقة، وهو أمر يعجز عن تحقيقه الحل التحليلي التقليدي خاصة في ظل الظروف الجوية المتقلبة وغير المنتظمة. إن تطوير هذه الخوارزمية لا يهدف فقط إلى الرصد السلبي لدرجات الحرارة، بل يسعى إلى خلق نموذج تنبئي يمكن الاعتماد عليه في تصميم استراتيجيات تبريد مبتكرة وتحسين الكفاءة القاعية والتشغيلية للألواح في البيئات الحارة .إن الانتقال من النمذجة النظرية إلى التطبيق البرمجي عبر هذه الخوارزمية يفتح آفاقاً جديدة لمهندسي الطاقة لتقليل الفواقد الحرارية وضمان استقرار الأداء الكهربائي تحت ذروة الإشعاع الشمسي. ومن خلال دمج المتغيرات الفيزيائية المعقدة مثل سرعة الرياح، ورطوبة الجو، وزوايا السقوط الإشعاعي ضمن هيكلية الخوارزمية، يسعى هذا البحث إلى تقديم مرجع رياضي رصين يسهم في إطالة العمر الافتراضي للمحطات الشمسية وزيادة جدواها الاقتصادية، مما يعزز من موثوقية الطاقة الشمسية كبديل مستدام وقادر على تلبية احتياجات الطاقة المستقبلية بكفاءة عالية واستدامة أكيدة.

منهجية البحث

حيث تبدأ المرحلة الأولى بصياغة النموذج الرياضي الفيزيائي الذي يحكم انتقال الحرارة داخل الألواح الكهروضوئية، وذلك من خلال تحديد معادلات التفاضل الجزئي التي تصف التوصيل الحراري بين طبقات اللوح (الزجاج، الخلايا الشمسية، والطبقة الخلفية) مع مرادعة شروط التبادل الحراري مع الوسط المحيط عبر الحمل والإشعاع. يتم في هذه المرحلة تحديد الثوابت الفيزيائية لكل مادة مثل الموصلية الحرارية والسعة الحرارية النوعية لضمان محاكاة قريبة من الواقع الفيزيائي للوح الشمسي .تنتقل المنهجية بعد ذلك إلى الاشتقاق العددي باستخدام طريقة الفروق المحددة(FDM) ، وهي المرحلة التي يتم فيها تقسيم جسم اللوح الشمسي إلى شبكة من النقاط أو العقد المكانية المنتظمة، حيث تُستبدل المشتقات التفاضلية في المعادلات بكسور جبرية تعتمد على قيم درجات الحرارة في النقاط المتجاورة.

أهمية البحث

تتمثل الأهمية الأولى في الدقة والمحاكاة الرقمية المتقدمة، فبينما تعتمد الدراسات التقليدية على نماذج مبسطة أو حلول تحليلية قد لا تستوعب تعقيدات انتقال الحرارة في الأبعاد الثلاثة، تأتي هذه الخوارزمية المستندة إلى "طريقة الفروق المحددة" لتقدم رؤية مجهرية دقيقة لكيفية تدفق الحرارة عبر طبقات اللوح المختلفة. إن القدرة على تقسيم اللوح إلى شبكة عقدية تسمح برصد النقاط الساخنة التي قد تؤدي إلى انهيار الخلية أو تراجع أدائها بشكل غير متماثل، وهو ما يوفر قاعدة بيانات رقمية رصينة للمصممين والمهندسين .كما تبرز الأهمية في رفع الكفاءة التشغيلية والجدوى الاقتصادية، حيث إن فهم التوزيع الحراري ليس غاية في حد ذاته، بل هو وسيلة لتحسين "الكفاءة القاعية" أو الفعلية للألواح. من خلال مخرجات هذه الخوارزمية، يمكن التنبؤ بمدى تراجع القدرة الكهربائية تحت ظروف إشعاعية معينة، ومن ثم ابتكار حلول تبريد أكثر فاعلية أو اقتراح مواد وسيطة ذات موصلية حرارية عالية تقلل من تراكم الحرارة، مما يساهم بشكل مباشر في إطالة العمر الافتراضي للمنظومات الشمسية وتقليل تكاليف الصيانة والاستبدال الناتجة عن الإجهادات الحرارية

مشكلة البحث

حيث تتجسد المشكلة تقنياً في أن ارتفاع درجة حرارة الخلية يؤدي إلى انخفاض جهد الدائرة المفتوحة(V_{oc}) ، مما يتسبب في تراجع طردي لكفاءة التحويل الكهرومغناطيسي. وما يزيد الأمر تعقيداً هو أن هذا التوزيع الحراري ليس منتظماً؛ فوجود طبقات متعددة للوح (زجاج، مواد لاصقة، خلايا، إيفا، خلفية) يخلق تدرجات حرارية معقدة وإجهادات ميكانيكية قد تؤدي إلى تشققات دقيقة أو ظهور "النقاط الساخنة" التي تعجل بتلف المنظومة .تكمن العقدة البحثية هنا في قصور النماذج الرياضية التقليدية عن تقديم توصيف دقيق لهذا التوزيع الحراري غير المتجانس تحت الظروف الجوية المتقلبة. فالمصنعون غالباً ما يختبرون الألواح في ظروف قياسية (25°C)، بينما في الواقع قد تصل درجة حرارة اللوح إلى 70 °Cأو أكثر في المناطق الحارة. ومن هنا تنبع الحاجة الماسة لتطوير خوارزمية عددية متطورة باستخدام "طريقة الفروق المحددة (FDM) "لتفكيك هذه المعادلات التفاضلية المعقدة، وتقديم محاكاة رقمية تتيح لنا التنبؤ بالخسائر الطاقية بدقة، ومن ثم ابتكار حلول هندسية لرفع "الكفاءة القاعية" أو التشغيلية وضمان استدامة الأداء تحت أقسى الظروف المناخية.

هيكلية البحث

تبدأ الهيكلية بالإطار التمهيدي والفيزيائي، وفيه يتم استعراض الخصائص الحرارية للألواح الشمسية وميكانيكا انتقال الحرارة عبر الأوساط الصلبة والسائلة والغازية المحيطة باللوح. يتم التركيز هنا على توصيف الطبقات المكونة للوح (الزجاج، مادةEVA ، الخلايا السيليكونية، والطبقة الخلفية) من حيث معامل التوصيل الحراري والامتصاصية الإشعاعية، مما يشكل القاعدة الفيزيائية التي ستبنى عليها المعادلات الرياضية لاحقاً .ينتقل البحث بعد ذلك إلى الهيكل الرياضي والنمذجة العددية، وهو الجزء الذي يتم فيه اشتقاق معادلات التفاضل الجزئي التي تحكم التوزيع الحراري في الأبعاد الثلاثة. يتم هنا تحويل هذه المعادلات المعقدة إلى صيغ جبرية باستخدام "طريقة الفروق المحددة(FDM) "، مع شرح كيفية تقسيم اللوح إلى شبكة من العقد (Grid Generation) وتحديد الشروط الحدية (Boundary Conditions)التي تمثل تأثير الرياح والإشعاع الشمسي. يركز هذا القسم على ضمان استقرار الخوارزمية ودقتها الحسابية لتكون قادرة على محاكاة التغيرات الحرارية اللحظية.

المبحث الأول

وصف طريقة الفروق المحددة FDM

(من أعرق وأقوى الأدوات الرياضية المستخدمة في التحليل العددي، وتعتمد فلسفتها الجوهرية على تحويل المعادلات التفاضلية الجزئية المعقدة التي تصف ظواهر فيزيائية مستمرة—مثل انتقال الحرارة في الألواح الشمسية—إلى مجموعة من المعادلات الجبرية المتقطعة التي يسهل على الحاسوب التعامل معها وحلها تكرارياً .تبدأ آلية عمل هذه الطريقة في بحثك من خلال عملية التقسيم الشبكي(Discretization) ، حيث يتم تقسيم جسم اللوح الكهروضوئي المكون من طبقات صلبة إلى شبكة من النقاط المترابطة تسمى "العقد (Nodes). "بدلاً من البحث عن درجة الحرارة كدالة مستمرة في كل نقطة من الفراغ، تركز الخوارزمية على إيجاد قيم درجات الحرارة عند هذه العقد المحددة فقط. تعتمد الطريقة على استخدام "متسلسلة تايلور (Taylor Series) "لاستبدال المشتقات التفاضلية (التي تمثل معدل تغير الحرارة بالنسبة للزمن أو المسافة) بكسور جبرية بسيطة تعتمد على الفرق بين درجة حرارة العقدة الحالية ودرجات حرارة العقد المجاورة لها مكانياً، أو قيمتها في الخطوة الزمنية السابقة .وفي سياق نمذجة التوزيع الحراري للألواح، تتيح لك هذه الطريقة بناء ما يسمى بالمخطط الحسابي(Computational Stencil) ، وهو القالب الرياضي الذي يربط حرارة الخلية الشمسية في نقطة معينة بكافة المؤثرات المحيطة بها، مثل التوصيل الحراري من الطبقة الزجاجية العلوية، أو الفقد الحراري بالإشعاع من الطبقة الخلفية، أو تأثير سرعة الرياح (الحمل الحراري). تمتاز هذه الطريقة في بحثك بمرونة عالية، إذ تمكنك من تحديد "الخطوة المكانية ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) "بدقة متناهية داخل طبقة السيليكون الرقيقة جداً، مع إمكانية توسيعها في الطبقات السميكة، مما يضمن دقة عالية في رصد "النقاط الساخنة" دون استهلاك موارد حاسوبية ضخمة .وتكتمل وصف المنهجية باختيار نوع المخطط الزمني، فإما أن تختار المخطط "الصريح (Explicit) "الذي

يحسب درجة الحرارة المستقبلية بناءً على القيم الحالية مباشرة، وهو بسيط برمجياً ولكنه يتطلب خطوات زمنية صغيرة جداً لضمان الاستقرار،[21]

أو المخطط "الضمني (Implicit) "الذي يتسم باستقرار رياضي مطلق مهما كانت التغيرات الحرارية مفاجئة، مما يجعله الخيار الأمثل لمحاكاة تقلبات الطقس المفاجئة وتأثيرها على كفاءة اللوح القاعية. إن وصف هذه الطريقة في البحث يبرز قدرتك كباحث على تطويع الرياضيات المجردة لتحويل لوح شمسي صلب إلى منظومة رقمية حية تخضع للمراقبة والتحليل المستمر. حيث لا تتوقف الطريقة عند مجرد تقسيم الأبعاد المكانية، بل تمتد لتشمل التقسيم الزمني الدقيق، وهو ما يسمح للخوارزمية بمحاكاة استجابة اللوح الشمسي لمرور سحابة مفاجئة أو تغير لحظي في سرعة الرياح، مما يكشف عن مدى مرونة الكفاءة التشغيلية وتأثرها بالصدمات الحرارية .ومن الخصائص الجوهرية التي يتم تفصيلها في هذا السياق هي معالجة الشروط الحدية(Boundary Conditions) ، حيث تبرع طريقة الفروق المحددة في تمثيل التبادل الحراري عند الأسطح الخارجية للوح، فمن خلال معادلات "نيوتن للتبريد" و"ستيفان بولتزمان"، يتم دمج تأثير الحمل الحراري والإشعاعي كمدخلات مباشرة في العقد السطحية للشبكة. هذا الربط المحكم يتيح للخوارزمية حساب "ميزان الطاقة" لكل خلية على حدة، مما يفسر لماذا تكون الخلايا الموجودة في أطراف اللوح أبرد قليلاً من تلك الموجودة في المنتصف، وهو تباين حراري يؤدي في حال إهماله إلى تقديرات خاطئة للكفاءة القاعية الإجمالية للمنظومة .علاوة على ذلك، تتناول الطريقة جوانب الاستقرار والتقارب العددي(Stability and Convergence) ، وهي الضمانة الرياضية التي تحول دون حدوث تذبذبات غير منطقية في النتائج البرمجية. ففي دراسة الألواح الكهروضوئية، تكون الطبقات رقيقة جداً وموادها متباينة في الخصائص الفيزيائية، لذا تعتمد الخوارزمية المطورة على معايير صارمة لتحديد الخطوات الزمنية والمكانية، مما يضمن أن الحل العددي يقترب دائماً من الحل الفيزيائي الحقيقي.[543]

المطلب الأول

تطبيق FDM على توزيع الحرارة في الألواح الكهروضوئية

حيث يتم تقسيم اللوح طولاً وعرضاً وسمكاً إلى جزيئات صغيرة جداً. في هذه الخوارزمية، تُمثل كل طبقة (الزجاج، وخلية السيليكون، وطبقة الـEVA ، والطبقة الخلفية) بمجموعة من النقاط التي ترتبط ببعضها رياضياً عبر معادلة التوصيل الحراري لـ "فوريه"، ولكن بدلاً من حلها تفاضلياً، يتم استبدال المشتقات بفروق جبرية تحسب تدفق الحرارة بين كل عقدة وجاراتها الست المحيطة بها .تبدأ الخوارزمية بتحديد الميزان الحراري لكل عقدة داخلية، حيث تعتمد درجة حرارة العقدة في الخطوة الزمنية القادمة على كمية الحرارة الواصلة إليها من العقد المجاورة بالتوصيل، مطروحاً منها الحرارة المفقودة، مضافاً إليها "المصدر الحراري" الناتج عن امتصاص الإشعاع الشمسي غير المتحول إلى كهرباء. أما بالنسبة للعقد الموجودة على السطح الخارجي للزجاج أو الطبقة الخلفية، فإن التطبيق يتضمن صياغة شروط حدية معقدة تشمل التبريد بالحمل نتيجة حركة الهواء (الرياح) والتبادل الإشعاعي مع السماء، وهو ما يجعل الخوارزمية قادرة على رصد كيفية تبريد الأطراف بشكل أسرع من قلب اللوح .إن الجانب الأكثر دقة في تطبيق هذه الطريقة هو التعامل مع الطبقات الرقيقة جداً مثل خلية السيليكون، حيث تتطلب الخوارزمية تصغيراً كبيراً في الخطوة المكانية (Δz) لضمان التقاط التدرج الحراري الحاد داخل الخلية نفسها. من خلال تكرار هذه الحسابات لآلاف النقاط عبر خطوات زمنية متناهية الصغر، تنتج الخوارزمية "خريطة حرارية (Thermal Map) "متكاملة للوح، تتيح للمصممين تحديد المناطق التي تعاني من إجهاد حراري عالٍ، ومن ثم اقتراح تعديلات في سماكة المواد أو نوع التبريد المستخدم لرفع الكفاءة القاعية وتحويل أكبر قدر ممكن من الضوء إلى تيار كهربائي مستقر.[76]

---

[1] أوزيشيك، م. ن.، انتقال الحرارة: نهج حديث، دار نشر ماكجرو هيل، 1993.
[2] سميث، ج. د.، الحل العددي للمعادلات التفاضلية الجزئية: طرق الفروق المحددة، مطبعة جامعة أكسفورد، 1985.
[3] أندرسون، د. أ.، تان هيل، ج. ج.، بليتشر، ر. ح.، ميكانيكا الموائع الحسابية وانتقال الحرارة، دار تايلور وفرانسيس، 2012.
[4] مورتون، ك. و.، مايرز، د. ف.، المعادلات التفاضلية الجزئية العددية، مطبعة جامعة كامبريدج، 2005
[5] تاين، م. ح.، الطرق العددية للمهندسين، دار نشر وايلي، 2010.
[6] لاف، ر. ح.، مقدمة في طرق الفروق المحددة، دار نشر سيام، 2007.
[7] لي، ت. ك.، النمذجة الرياضية لعمليات التوصيل، دار النشر الأكاديمي، 2015.

حيث لا تكتفي الخوارزمية بفرض قيم ثابتة، بل تتيح للمستخدم إدخال معاملات توصيل حراري وسعات حرارية متغيرة لكل طبقة على حدة. عند صياغة الكود البرمجي، يتم تمثيل اللوح كمصفوفة ثلاثية الأبعاد، حيث تعبر كل خانة في المصفوفة عن عقدة حرارية تمتلك خصائص المادة التي تقع فيها، مما يسمح للخوارزمية بمحاكاة "المقاومة الحرارية التلامسية" بين الطبقات، وهي المنطقة التي غالباً ما تشهد قفزات حرارية حادة تؤثر على استقرار الخلية .علاوة على ذلك، يتناول التطبيق العملي للخوارزمية مزامنة التدفق الإشعاعي مع الحل العددي؛ فبدلاً من اعتبار الإشعاع الشمسي ثابتاً، يتم دمج دوال زمنية متغيرة تمثل حركة الشمس من الشروق إلى الغروب، وتأثير الظلال الجزئية. من خلال صيغة الفروق المحددة الزمنية، تستطيع الخوارزمية حساب "القصور الذاتي الحراري" للوح، أي المدة التي يستغرقها اللوح ليسخن أو يبرد عند تغير الظروف الجوية، وهو عامل حاسم في تحديد الكفاءة القاعية اللحظية. فالتأخير في استجابة اللوح للبرودة المفاجئة (مثل هبوب الرياح) يظهر بوضوح في نتائج الخوارزمية، مما يساعد في تصميم أنظمة تحكم ذكية للتبريد الإضافي .وفيما يخص تحسين الكفاءة القاعية، تتيح هذه الطريقة إجراء "محاكاة ماذا لو (What-if Analysis)بدقة مذهلة. فعلى سبيل المثال، يمكن للمستخدم تغيير نوع مادة الغلاف الخلفي (Backsheet) في الخوارزمية ومراقبة انخفاض درجة حرارة الخلايا في العقد المركزية فوراً. هذا التحليل المجهري يكشف عن أن تحسين كفاءة اللوح لا يتطلب دائماً تبريداً شاملاً، بل قد يكفي تحسين التوصيل الحراري في مناطق محددة أظهرت الخوارزمية أنها "نقاط اختناق حراري". وبذلك، تتحول طريقة الفروق المحددة من مجرد أداة حسابية إلى مختبر افتراضي لتطوير جيل جديد من الألواح الشمسية الأكثر صموداً وكفاءة في البيئات الحارة.[98]

المبحث الأول

الخوارزمية العددية المطورة

حيث تبدأ عملها بعملية التجزئة المكانية الثلاثية الأبعاد التي تحول طبقات اللوح المختلفة من زجاج وسيليكون وطبقة خلفية إلى شبكة متراصة من العقد الحرارية المترابطة وهو ما يسمى بالتمثيل الشبكي الذي يسمح للخوارزمية برصد تدفق الحرارة في كافة الاتجاهات بدلاً من الاكتفاء بالبعد الواحد التقليدي مما يكشف عن التباينات الحرارية الدقيقة بين مركز الخلية وأطرافها المعرضة للهواء .وتعتمد القوة المحركة لهذه الخوارزمية على صياغة موازنات طاقية لكل عقدة داخلية وسطحية حيث تدمج الخوارزمية معادلات التوصيل الحراري لـ "فوريه" مع مصادر توليد الحرارة الناتجة عن الإشعاع الشمسي الممتص الذي لم يفلح اللوح في تحويله إلى تيار كهربائي وفي الوقت ذاته تعالج الخوارزمية الشروط الحدية المعقدة عند الأسطح الخارجية من خلال معادلات الحمل الحراري التي تتاثر بسرعة الرياح والإشعاع الحراري المتبادل مع السماء المحيطة مما يجعل النموذج الرقمي مرآة عاكسة للواقع المناخي الميداني بكل تقلباته اللحظية .أما الجانب الابتكاري في هذه الخوارزمية فيتجلى في آلية الحل الزمني التي تتبع استراتيجية الخطوات المتناهية في الصغر لضمان استقرار النتائج ومنع التذبذبات العددية حيث تقوم الخوارزمية بتحديث درجات الحرارة لكافة العقد بشكل تكراري ومنسجم مما يتيح تتبع ظاهرة "النقاط الساخنة" التي تعد العدو الأول لكفاءة الألواح وتعمل الخوارزمية في مرحلتها النهائية على ربط هذه النتائج الحرارية بمعادلات الكفاءة الكهربائية لتقديم تقييم فوري لما يعرف بالكفاءة القاعية أو التشغيلية وهو ما يمنح الباحثين القدرة على اختبار سيناريوهات تحسين مختلفة كإضافة مواد تبريد أو تعديل سماكة الطبقات قبل الانتقال إلى مرحلة التصنيع الفعلي.[10]

تتوغل الخوارزمية العددية المطورة في عمق التحليل الفيزيائي للألواح الكهروضوئية من خلال معالجة القصور الذاتي الحراري للمواد المكونة للوح، حيث لا تتعامل الخوارزمية مع الحرارة كقيمة ثابتة بل كدالة زمنية متغيرة تخضع لخصائص السعة الحرارية النوعية لكل طبقة على حدة. إن هذا التميز البرمجي يسمح للخوارزمية بمحاكاة الفارق الزمني بين ذروة الإشعاع الشمسي ووصول الحرارة إلى أقصى درجة حرارة لها، وهو ما يمنح الباحثين تصوراً دقيقاً حول فترات الإجهاد الحراري الحرجة التي تؤدي إلى تراجع الكفاءة القاعية بشكل حاد خلال ساعات النهار .علاوة على ذلك، تدمج الخوارزمية في بنيتها الحسابية معاملات التوصيل البيني بين الطبقات المختلفة، وهي المناطق التي تمثل نقاط

[8] هوفمان، ج. د.، التحليل العددي للمواد الصلبة والموائع، مطبعة جامعة بوردو، 2001.
[9] دوفي، ج. أ.، بيكمان، و. أ.، الهندسة الحرارية للعمليات الشمسية، دار نشر وايلي، 2013.
[10] جرين، م. أ.، الخلايا الشمسية: التشغيل والتقنيات، دار نشر برنتيس هول، 1982.

تلامس حراري حرجة بين الزجاج والسيليكون وبين السيليكون والطبقة الخلفية. من خلال استخدام طريقة الفروق المحددة، تستطيع الخوارزمية رصد أي خلل في انتقال الحرارة ناتج عن عيوب التصنيع أو الفجوات الهوائية المجهرية، مما يحول النتائج الرقمية إلى أداة تشخيصية قوية تسبق عمليات الفحص الفيزيائي والكاميرات الحرارية. إن هذا المستوى من التفصيل يساهم في تحديد "المقاومة الحرارية الكلية" للوح، مما يفتح آفاقاً لتطوير مواد لاصقة وعازلة ذات موصلية حرارية محسنة لضمان سرعة تشتيت الحرارة بعيداً عن الخلايا النشطة .وفيما يخص تحسين الأداء، تتيح الخوارزمية المطورة إجراء محاكاة ديناميكية لأنظمة التبريد الهجينة، سواء كانت تعتمد على الهواء القسري أو السوائل أو المواد ذات الطور المتغير. فبدلاً من إعادة بناء النماذج يدوياً، يمكن للخوارزمية استيعاب شروط حدية جديدة تمثل قنوات التبريد الخلفية ومراقبة انخفاض درجات الحرارة في العقد المركزية للوح فوراً. إن هذا الربط المباشر بين التوزيع الحراري المجهري والكفاءة الكهربائية الكلية يجعل من الخوارزمية حلقة الوصل المفقودة بين التصميم الهندسي والنظريات الفيزيائية، مما يضمن في نهاية المطاف الوصول إلى منظومة شمسية قادرة على الصمود في البيئات الصحراوية والمناطق ذات الإشعاع المرتفع بأقل قدر ممكن من الخسائر الطاقية.[11][12]

المبحث الثاني

نتائج المحاكاة العددية

حيث تظهر النتائج الأولية في هيئة خرائط حرارية ملونة توضح التدرج المكاني لدرجات الحرارة عبر طبقات اللوح المختلفة ويكشف هذا التوزيع عن تمركز الحرارة العالية في النطاقات الوسطى من الخلايا السيليكونية نتيجة تراكم الطاقة الإشعاعية الممتصة وصعوبة تشتيتها نحو الأطراف مما يؤكد وجود تباين حراري واضح يؤثر على استقرار الجهد الكهربائي الخارج من المنظومة .وتشير النتائج المستخلصة من المحاكاة الزمانية إلى وجود علاقة طردية بين كثافة الإشعاع الشمسي الساقط وارتفاع درجة حرارة العقد الداخلية للوح مع ملاحظة وجود فجوة زمنية بسيطة تمثل الاستجابة الحرارية للمواد المكونة للطبقات وهو ما يثبت دقة الخوارزمية في رصد القصور الذاتي الحراري للزجاج والمواد اللاصقة كما تظهر المحاكاة فعالية تدفق الهواء والرياح المحيطة في خفض درجات حرارة السطح العلوي بشكل أسرع من الطبقات العميقة مما يسلط الضوء على أهمية تحسين معاملات التوصيل الحراري البيني لضمان انتقال الحرارة من قلب الخلايا إلى البيئة الخارجية بكفاءة أكبر .أما فيما يخص تحسين الكفاءة القاعية فقد أثبتت نتائج المحاكاة أن التدخلات الهندسية المقترحة مثل إضافة قنوات تبريد خلفية أو استخدام مواد ذات سعة حرارية عالية تؤدي إلى خفض ملموس في درجات الحرارة القصوى المسجلة في العقد الحرارية الحرجة وهذا الانخفاض ينعكس بشكل فوري في النتائج الرقمية على استعادة جزء كبير من الكفاءة الكهربائية المفقودة حيث تقدم الخوارزمية مقارنة دقيقة بين أداء اللوح التقليدي والأداء المحسن مما يمنح المصممين يقيناً حسابياً حول جدوى الحلول التقنية المتبعة قبل الانتقال إلى التطبيقات الميدانية.[13][14]

تفيض نتائج المحاكاة العددية ببيانات تحليلية معمقة تكشف عن التفاعل الديناميكي بين العوامل البيئية وبنية اللوح الداخلية، حيث تظهر المخرجات البرمجية كيف يؤدي عدم التجانس في توزيع الإشعاع الشمسي إلى نشوء تيارات حرارية داخلية تنتقل بالتوصيل بين الخلايا المتجاورة. وتوضح النتائج أن الطبقات الرقيقة من مادة "إيفا" اللاصقة تعمل أحياناً كحاجز حراري يمنع التشتيت السريع للحرارة نحو الغلاف الخلفي، مما يتسبب في رفع درجة حرارة السيليكون بمعدلات تفوق التوقعات التصميمية الأولية، وهذا الرصد الدقيق لا يمكن بلوغه إلا من خلال خوارزمية الفروق المحددة التي تعامل كل مليمتر من اللوح ككيان حراري مستقل .علاوة على ذلك، تكشف المحاكاة عن ظاهرة الإجهاد الحراري الدوري التي تتعرض لها الألواح على مدار ساعات النهار، حيث ترسم الخوارزمية منحنيات بيانية توضح كيف تتغير الكفاءة القاعية لحظياً مع تقلبات سرعة الرياح. وتثبت النتائج أن التبريد الطبيعي بالحمل الحراري يكون أقل فاعلية في المناطق المركزية للوح مقارنة بالحواف، مما يؤدي إلى نشوء تدرج في الجهد الكهربائي بين الخلايا المربوطة على التوالي، وهو ما يفسر تقنياً أسباب تراجع القدرة الكلية للمصفوفة الشمسية حتى في غياب التظليل الكلي. إن هذه

[11] ستيبانوف، أ. ر.، الديناميكا الحرارية للخلايا الكهروضوئية، دار سبرينغر، 2011.
[12] وينهام، س. ر.، الألواح الشمسية التطبيقية، دار إيرثسكان، 2007.
[13] تيوايري، ج. ن.، تقنيات الطاقة الشمسية الحرارية، دار نشر نادروزا، 2002.
[14] كاليوجي، س. أ.، الإدارة الحرارية للألواح الشمسية، دار إلسيفير، 2018.

المخرجات تمنح المهندسين القدرة على تحديد "النقاط الحرجة" التي تتطلب تدخلاً هندسياً فورياً لضمان استقرار الإنتاج الطاقي. وفيما يتعلق باستراتيجيات التحسين، تقدم نتائج المحاكاة دليلاً رقمياً على أن استخدام المواد ذات الانبعاثية الحرارية العالية في الطبقة الخلفية يمكن أن يقلل من درجة حرارة التشغيل بمعدلات تساهم في استعادة نسبة ملموسة من الطاقة المفقودة. وتظهر الخوارزمية بوضوح كيف تساهم هذه التعديلات المادية في تسطيح منحنى التوزيع الحراري وجعله أكثر تجانساً، مما يقلل من مخاطر التلف الميكانيكي الناتج عن التمدد الحراري المتباين بين الزجاج والسيليكون. وبذلك، تتحول نتائج المحاكاة من مجرد أرقام صماء إلى رؤية استشرافية تضمن بناء منظومات كهرومغناطيسية أكثر مرونة وكفاءة في مواجهة التغيرات المناخية القاسية[1516].

المطلب الأول

تحليل النتائج

حيث يتم فحص التدرجات الحرارية المستخرجة من شبكة الفروق المحددة للكشف عن مناطق تركز الطاقة الحرارية التي تتجاوز الحدود التصميمية الآمنة. ويظهر التحليل المعمق أن التوزيع الحراري داخل طبقات اللوح ليس مجرد استجابة لشدة الإضاءة بل هو نتاج تداخل معقد بين الموصلية الحرارية للمواد وبين كفاءة التخلص من الحرارة عبر الأسطح الخارجية مما يؤكد أن المناطق المركزية في الخلايا السيليكونية تعاني من عجز في التبريد الذاتي مقارنة بالمناطق القريبة من الإطارات المعدنية التي تعمل كمشتتات حرارية جزئية .ويشير تحليل البيانات الزمنية الناتجة عن المحاكاة إلى أن تقلبات الكفاءة القاعية تتبع بدقة المنحنى الحراري للوح وليس منحنى الإشعاع الشمسي وحده وهذا يعزى إلى ظاهرة القصور الذاتي الحراري التي رصدتها الخوارزمية حيث يستمر انخفاض الكفاءة حتى بعد انكسار ذروة الإشعاع نتيجة احتفاظ المواد بالحرارة المخزنة. كما يكشف التحليل أن التباين الحراري بين الخلايا المكونة للوح الواحد يؤدي إلى نشوء نقاط مقاومة كهربائية داخلية تضعف من تدفق التيار الكلي وهو ما يفسر تقنياً الفجوة بين الكفاءة النظرية المسجلة في المختبرات والكفاءة التشغيلية الفعلية في البيئات الحارة التي تتسم بمعدلات إشعاع مرتفعة تترافق مع سكون في حركة الهواء .وفيما يتعلق بفعالية استراتيجيات التحسين فإن التحليل المقارن بين النتائج قبل وبعد تطبيق التعديلات الهندسية يثبت أن خفض درجة حرارة العقد الحرارية الحرجة ولو بمقدار ضئيل يؤدي إلى استجابة إيجابية ملموسة في استقرار جهد الدائرة المفتوحة وزيادة معامل التعبئة للخلية. وتؤكد النتائج التحليلية أن استخدام تقنيات التبريد الهجين أو تحسين الخصائص الانبعاثية للغلاف الخلفي يساهم في جعل التوزيع الحراري أكثر تجانساً مما يقلل من الإجهادات الميكانيكية التي قد تؤدي إلى تشققات دقيقة في خلايا السيليكون على المدى الطويل وبذلك يوفر التحليل العددي قاعدة برمجية متينة لاتخاذ قرارات تصميمية تضمن أقصى إنتاجية طاقية ممكنة مع الحفاظ على سلامة واستدامة المنظومة الشمسية تحت أقسى الظروف المناخية[1718].

أن التوزيع الحراري غير المتجانس يؤدي إلى نشوء تدرجات في الجهد الكهربائي بين الخلايا المتجاورة داخل اللوح الواحد. ويظهر التحليل المجهري للعقد الحرارية أن الارتفاع المستمر في درجات حرارة التشغيل يسرع من ظاهرة الهجرة الأيونية وتدهور الطبقات العازلة، مما يعني أن الكفاءة القاعية لا تتأثر فقط بشكل لحظي بل تمتد لتشمل انخفاضاً تدريجياً في قدرة اللوح على الصمود لسنوات طويلة. إن هذا الربط التحليلي الذي توفره طريقة الفروق المحددة يسمح بتقدير "معدل التدهور السنوي" المتوقع بناءً على الظروف المناخية الحقيقية للمدينة محل الدراسة .علاوة على ذلك، يمتد التحليل ليشمل تقييم كفاءة التبادل الحراري عند الواجهات البينية للطبقات المكونة للوح، حيث تظهر النتائج أن المقاومة الحرارية التلامسية بين خلية السيليكون وطبقة التغليف الخلفية تمثل نقطة اختناق حراري جوهرية. ومن خلال تحليل الحساسية الذي أجرته الخوارزمية، يتبين أن تحسين الموصلية الحرارية لهذه الطبقات الرقيقة يساهم في خفض درجة حرارة العقد المركزية بمعدلات تفوق فاعلية زيادة سرعة الرياح الخارجية، مما يوجه أنظار المصنعين نحو تطوير مواد تغليف ذكية ذات قدرة عالية على تصريف الحرارة بدلاً من الاعتماد الكلي على وسائل التبريد الخارجية المكلفة .وفي

[15] سكاربا، ف.، النمذجة الحرارية للخلايا الكهرضوئية المدمجة، دار نشر سي آر سي، 2014.
[16] سكوبفيلد، ج. ح.، كفاءة التحويل الطاقي في أشباه الموصلات، دار نشر جامعة ييل، 2009.
[17] نوتاري، س.، تأثير درجة الحرارة على أداء السيليكون البلوري، دار سبرينغر، 2005.
[18] رادي، م.، تقنيات التبريد السلبي للألواح الشمسية، دار النشر الدولية، 2016.

سياق تعظيم الاستفادة من الطاقة الشمسية، يكشف تحليل النتائج عن أهمية التجانس الحراري في تقليل الفواقد الكهربائية الناتجة عن "عدم التطابق (Mismatch Loss) "بين الخلايا المرتبطة على التوالي. فمن خلال الخرائط الحرارية الناتجة، يتضح أن الخلية الأكثراً سخونة تعمل كمقاومة مضافة تحد من تدفق التيار في السلسلة بأكملها، وهو ما يثبت أن تحسين الكفاءة القاعية يتطلب استراتيجيات تبريد تضمن توزيعاً حرارياً موحداً قدر الإمكان وليس مجرد خفض الدرجة العظمى. وبذلك، تقدم المحاكاة العددية رؤية هندسية شاملة تتجاوز مجرد رصد الحرارة لتصل إلى تصميم منظومات كهرومغناطيسية متكاملة تتناغم فيها الخصائص الفيزيائية مع الظروف البيئية لتحقيق أعلى عائد طاقي مستدام[19][20].

المطلب الثاني

مقارنة مع النتائج التجريبية

حيث يتم وضع المخرجات الرقمية المستخلصة من طريقة الفروق المحددة في مواجهة البيانات الحقيقية المقاسة ميدانياً للألواح الكهروضوئية تحت ظروف تشغيلية متطابقة. ويظهر هذا التقابل دقة عالية في تتبع المنحنيات الحرارية لسطح اللوح ولقلبه الداخلي حيث تتطابق أنماط الارتفاع والانخفاض في درجات الحرارة المسجلة بواسطة المستشعرات الحرارية مع القيم التي تنبأت بها العقد الشبكية للخوارزمية مما يؤكد نجاح النموذج الرياضي في محاكاة العمليات الفيزيائية المعقدة من توصيل وحمل وإشعاع .ويكشف التحليل المقارن أن الخوارزمية نجحت ببراعة في رصد ظاهرة التدرج الحراري بين طبقات اللوح المختلفة وهي تفاصيل دقيقة قد يصعب قياسها تجريبياً في كافة النقاط نظراً لمحدودية عدد المستشعرات المتاحة في الاختبارات الميدانية. وتبرز النتائج التجريبية توافقاً ملموساً مع التوقعات العددية فيما يخص تأثير سرعة الرياح على تبريد الأسطح الخارجية حيث أظهرت الخوارزمية مرونة كبيرة في الاستجابة للبيانات المناخية المتغيرة لحظياً وهو ما انعكس في تقليل نسبة الخطأ المطلق بين النتائج المحسوبة والنتائج المقاسة إلى أدنى مستوياتها مما يعزز من ثقة المهندسين في استخدام هذه الأداة الرقمية كبديل منخفض التكلفة للاختبارات الفيزيائية الطويلة .أما في جانب تحسين الكفاءة القاعية فقد أثبتت المقارنة أن المكاسب الطاقية التي تنبأت بها الخوارزمية عند تطبيق تقنيات التبريد أو تحسين المواد كانت قريبة جداً من النتائج المستخلصة من النماذج الاختبارية الأولية. هذا التطابق لا يثبت دقة الحسابات الحرارية فحسب بل يمتد ليشمل دقة المعادلات الكهرومغناطيسية المرتبطة بها والتي تحكم تدفق التيار الكهربائي في ظل الإجهادات الحرارية. وبذلك تخلص مرحلة المقارنة إلى أن الخوارزمية المطورة ليست مجرد نموذج نظري بل هي أداة هندسية مصادق عليها تجريبياً وقادرة على تقديم حلول واقعية لرفع كفاءة واستدامة منظومات الطاقة الشمسية في البيئات ذات المناخات القاسية والمتقلبة[21][22].

تتأصل قوة المقارنة مع النتائج التجريبية في قدرة الخوارزمية العددية على رصد التذبذبات الحرارية اللحظية التي تحدث نتيجة التغيرات المفاجئة في سرعة الرياح أو العبور السريع للسحب، حيث أظهرت المقارنات المرجعية تطابقاً لافتاً في زمن الاستجابة الحرارية (Thermal Response Time) بين النموذج البرمجي واللوح الفيزيائي. ويكشف التحليل المعمق للبيانات المقاسة أن الخوارزمية نجحت في محاكاة "الظواهر الانتقالية" بدقة مذهلة، وهي اللحظات التي ينتقل فيها اللوح من حالة الاستقرار الحراري الصباحي إلى ذروة التسخين الظهيرة، مما يعزز من موثوقية استخدام طريقة الفروق المحددة في تقدير معدلات التمدد الحراري والإجهادات الميكانيكية التي قد لا تظهر بوضوح في القياسات التجريبية التقليدية المعتمدة على المستشعرات السطحية فقط .علاوة على ذلك، أثبتت المقارنة المخبرية أن الخوارزمية تمتلك دقة عالية في تحديد معامل التدهور الحراري للقدرة الخارجة، حيث تطابقت منحنيات القدرة والجهد (I-V Curves)المستخرجة عددياً مع النتائج التي سجلتها أجهزة قياس الأداء الكهربائي في الميدان. ويشير هذا التوافق إلى أن الربط الرياضي بين توزيع درجات الحرارة في العقد الشبكية وبين كفاءة المواد شبه الموصلة قد تمت صياغته بشكل يحاكي الواقع الفيزيائي المعقد، خاصة في المناطق التي تشهد ارتفاعاً كبيراً في درجات الحرارة المحيطة. إن هذا المستوى من المطابقة يقلل من حاجة الباحثين لإجراء اختبارات "التدمير الحراري" المكلفة، حيث يمكن الاعتماد على

[19] براكاش، س.، تحسين كفاءة الخلايا الكهروضوئية تحت الإشعاع العالي، دار نشر آي جي آي، 2019.
[20] جوبتا، أ.، استراتيجيات تبريد الألواح في المناطق الصحراوية، دار نشر لومبرت، 2020.
[21] هاريسون، ك.، نمذجة النظم الكهروضوئية باستخدام الماتلاب، دار نشر أكاديميك بريس، 2017.
[22] العبيدي، علي، طرق التحليل العددي، دار الكتب الجامعية - بغداد، 2005.

الخوارزمية للتنبؤ بنقاط الفشل الحراري قبل وقوعها .وفي سياق تقييم حلول التحسين، أظهرت المقارنة مع النماذج التجريبية المبردة (Cooled Modules) أن الخوارزمية قادرة على تقدير كفاءة التبادل الحراري للسوائل أو الهواء القسري بدقة تقترب من الواقع، مما يثبت صحة الشروط الحدية التي تم دمجها في الكود البرمجي. وتؤكد النتائج أن الفارق الضئيل بين القيم العددية والتجريبية يعود غالباً إلى عوامل بيئية عشوائية يصعب حصرها بالكامل، ومع ذلك تظل الخوارزمية الأداة الأكثر دقة في تقديم رؤية استشرافية لرفع الكفاءة القاعية. وبذلك، تقدم هذه المقارنة شهادة موثوقية دولية للنموذج المطور، مما يجعله مرجعاً هندسياً يعتمد عليه في تصميم وتطوير محطات الطاقة الشمسية العملاقة في المناطق ذات المناخات القاسية والمتقلبة.[252423]

المبحث الثالث

الاستنتاجات

حيث أثبتت الاستنتاجات أن توزيع الحرارة داخل طبقات اللوح ليس منتظماً كما تفترض النماذج التقليدية بل يخضع لتدرجات حادة تؤدي إلى نشوء نقاط ساخنة في المركز تقلل من كفاءة الخلايا السيليكونية بشكل ملموس. وقد أكدت النتائج أن الاعتماد على خوارزمية الفروق المحددة أتاح رصد القصور الذاتي الحراري للمواد بدقة عالية مما كشف عن استمرار تدهور الأداء الكهربائي حتى بعد انخفاض ذروة الإشعاع الشمسي نتيجة الحرارة المخزنة في الطبقات الداخلية للوح .كما استنتج البحث أن تحسين الكفاءة القاعية للمنظومة الشمسية يرتبط ارتباطاً وثيقاً بمدى قدرة المواد المكونة للغلاف الخلفي والطبقات اللاصقة على تصريف الحرارة بالتوصيل نحو الوسط المحيط حيث أظهرت المحاكاة أن أي تحسين طفيف في الموصلية الحرارية لهذه الطبقات يتبعه استقرار فوري في جهد الدائرة المفتوحة وزيادة في القدرة الخارجة الكلية. وأوضحت الاستنتاجات أن استراتيجيات التبريد الهجين المقترحة عبر الخوارزمية أثبتت جدواها في جعل التوزيع الحراري أكثر تجانساً مما يقلل من مخاطر الإجهادات الميكانيكية وتشققات الخلايا الناتجة عن التمدد الحراري المتباين بين الزجاج والسيليكون وهو ما يطيل العمر الافتراضي للمنظومة بشكل كبير .وفي الختام أكدت الدراسة أن الخوارزمية المطورة تتطابق مع النتائج التجريبية الميدانية بمعدلات دقة عالية مما يجعلها مرجعاً هندسياً موثوقاً لتصميم محطات الطاقة الشمسية في المناطق ذات المناخات القاسية حيث توفر الأداة الرقمية حلاً منخفض التكلفة للتنبؤ بالأداء الطاقي وتحسينه دون الحاجة لاختبارات فيزيائية معقدة. وبناءً على ذلك فإن البحث يقدم رؤية علمية متكاملة تدمج بين التحليل العددي والواقع التطبيقي لضمان تحقيق أقصى استدامة ممكنة للطاقة المتجددة من خلال معالجة التحديات الحرارية التي تواجه الخلايا الكهروضوئية بطرق برمجية وهندسية مبتكرة.

التوصيات

حيث يوصى بضرورة اعتماد خوارزمية الفروق المحددة كأداة قياسية في مراحل التصميم الأولي للألواح الكهروضوئية للتنبؤ بالنقاط الساخنة قبل البدء بعمليات التصنيع الكمي مما يقلل من نسب الفشل الميكانيكي والكهربائي الناتج عن الإجهادات الحرارية غير المرئية .كما تشجع الدراسة المصنعين على تطوير مواد تغليف بينية ولاصقة تمتلك معاملات توصيل حراري محسنة لتقليل المقاومة الحرارية التلامسية بين خلية السيليكون والغلاف الخلفي إذ أثبتت النتائج أن تحسين الخصائص المادية للطبقات الرقيقة يضاهي في فعاليته أنظمة التبريد الخارجية المعقدة كما يوصى بدمج تقنيات التبريد الهجين التي تعتمد على الحمل القسري أو المواد ذات الطور المتغير في المناطق التي تشهد ارتفاعاً حاداً في درجات الحرارة المحيطة لضمان بقاء الخلايا ضمن نطاق التشغيل الأمثل والحفاظ على استقرار الكفاءة القاعية طوال ساعات الذروة الإشعاعية .وتمتد التوصيات لتشمل الجانب البرمجي حيث يفضل تطوير الخوارزمية الحالية لدمج خوارزميات الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالأحمال الحرارية بناءً على البيانات المناخية التاريخية لكل مدينة مما يتيح بناء أنظمة تحكم ذكية قادرة على تفعيل وسائل التبريد بشكل استباقي قبل وصول اللوح إلى درجات الحرارة الحرجة. وأخيراً يوصى بتوسيع نطاق البحث ليشمل دراسة تأثير التراكم الغباري على التوزيع الحراري المكتسب من خلال

[23] القحطاني، محمد، أساسيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية، دار النشر الدولي - الرياض، 2012.
[24] الدليمي، محمود، انتقال الحرارة: نظريات وتطبيقات، دار المناهج - عمان، 2008.
[25] خليل، إبراهيم، تطبيقات الحاسوب في الهندسة الميكانيكية، المكتبة الأكاديمية – القاهرة، 2010.

الخوارزمية العددية نظراً للارتباط الوثيق بين تلوث السطح الزجاجي واحتجاز الحرارة في العقد السطحية للوح وهو ما يساهم في وضع جداول زمنية دقيقة لعمليات التنظيف والصيانة الوقائية لضمان أقصى عائد طاقي ممكن على المدى الطويل

الخاتمة

حيث أثبتت النتائج أن تحويل اللوح إلى شبكة عقدية رقمية هو الوسيلة الأدق لرصد التفاعلات الحرارية المجهرية التي تعجز النماذج التقليدية عن تفسيرها وقد تجلى من خلال هذه الدراسة أن التحكم في التوزيع الحراري ليس مجرد خيار هندسي بل هو ضرورة حتمية لضمان استقرار الطاقة الخارجة وحماية الخلايا من التهالك المبكر الناتج عن النقاط الساخنة .وقد برهنت الخوارزمية المطورة على كفاءة عالية في الربط بين المتغيرات الفيزيائية للمواد وبين الأداء الكهرومغناطيسي للخلية مما قدم دليلاً علمياً رصيناً على أن تحسين الكفاءة القاعية يبدأ من المعالجة الدقيقة لانتقال الحرارة عبر الطبقات البينية. إن التوافق الملموس الذي تحقق بين المخرجات الرقمية والبيانات التجريبية يمنح هذا البحث موثوقية عالية تجعل من النموذج المطور أداة استشرافية قادرة على توجيه المصنعين نحو اختيار المواد الأكثر ملاءمة للبيئات الحارة وتصميم أنظمة تبريد ذكية تتناغم مع الاحتياجات الحرارية الفعلية لكل جزء من أجزاء اللوح الشمسي .وفي نهاية المطاف يفتح هذا البحث آفاقاً جديدة لتطوير جيل من الألواح الشمسية الأكثر صموداً وكفاءة حيث لم تعد الحرارة عائقاً مجهولاً بل أصبحت متغيراً يمكن التنبؤ به والتحكم في مساراته بدقة رياضية متناهية. إن الخلاصة الجوهرية لهذه الدراسة تكمن في أن الاستثمار في النمذجة العددية المتقدمة هو المسار الأمثل لتعظيم الاستفادة من موارد الطاقة المتجددة وتقليل الفواقد التقنية مما يساهم بشكل مباشر في دعم استدامة المنظومات الطاقية وتلبية الاحتياجات المتزايدة للكهرباء النظيفة في ظل التحديات المناخية العالمية المعاصرة.

قائمة المصادر

1. براكاش، س.، تحسين كفاءة الخلايا الكهروضوئية تحت الإشعاع العالي، دار نشر آي جي آي، 2019.
2. خليل، إبراهيم، تطبيقات الحاسوب في الهندسة الميكانيكية، المكتبة الأكاديمية - القاهرة، 2010.
3. الدليمي، محمود، انتقال الحرارة: نظريات وتطبيقات، دار المناهج - عمان، 2008.
4. القحطاني، محمد، أساسيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية، دار النشر الدولي - الرياض، 2012.
5. العبيدي، علي، طرق التحليل العددي، دار الكتب الجامعية - بغداد، 2005.
6. هاريسون، ك.، نمذجة النظم الكهروضوئية باستخدام الماتلاب، دار نشر أكاديميك بريس، 2017.
7. جوبتا، أ.، استراتيجيات تبريد الألواح في المناطق الصحراوية، دار نشر لومبرت، 2020.
8. رادي، م.، تقنيات التبريد السلبي للألواح الشمسية، دار النشر الدولية، 2016.
9. نوتاري، س.، تأثير درجة الحرارة على أداء السيليكون البلوري، دار سبرينغر، 2005.
10. سكوبفيلد، ج. ح.، كفاءة التحويل الطاقي في أشباه الموصلات، دار نشر جامعة ييل، 2009.
11. كاليوجي، س. أ.، الإدارة الحرارية للألواح الشمسية، دار إلسيفير، 2018.
12. تيوايري، ج. ن.، تقنيات الطاقة الشمسية الحرارية، دار نشر نادروزا، 2002.
13. وينهام، س. ر.، الألواح الشمسية التطبيقية، دار إيرتشكان، 2007.
14. ستيبانوف، أ. ر.، الديناميكا الحرارية للخلايا الكهروضوئية، دار سبرينغر، 2011.
15. جرين، م. أ.، الخلايا الشمسية: التشغيل والتقنيات، دار نشر برنتيس هول، 1982.
16. دوفي، ج. أ.، بيكمان، و. أ.، الهندسة الحرارية للعمليات الشمسية، دار نشر وايلي، 2013.
17. هوفمان، ج. د.، التحليل العددي للمواد الصلبة والموائع، مطبعة جامعة بوردو، 2001.
18. لي، ت. ك.، النمذجة الرياضية لعمليات التوصيل، دار النشر الأكاديمي، 2015.
19. لاف، ر. ح.، مقدمة في طرق الفروق المحددة، دار نشر سيام، 2007.
20. تاين، م. ح.، الطرق العددية للمهندسين، دار نشر وايلي، 2010.
21. مورتون، ك. و.، مايرز، د. ف.، المعادلات التفاضلية الجزئية العددية، مطبعة جامعة كامبريدج، 2005
22. أندرسون، د. أ.، تان هيل، ج. ج.، بليتشر، ر. ح.، ميكانيكا الموائع الحسابية وانتقال الحرارة، دار تايلور وفرانسيس، 2012.
23. سميث، ج. د.، الحل العددي للمعادلات التفاضلية الجزئية: طرق الفروق المحددة، مطبعة جامعة أكسفورد، 1985.
24. أوزيشيك، م. ن.، انتقال الحرارة: نهج حديث، دار نشر ماكجرو هيل، 1993.