مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٥) ٢٠٢٦

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (5) 2026

كشف وتشخيص الأعطال في الوحدات الكهروضوئية باستخدام الشبكات العصبونية ومراقبتها عن طريق تقنية إنترنت الأشياء IOT

د. صفاء الأحمد *

رنيم مصطفى **

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٦/١/٢٢ . قُبِل للنشر في ٢٠٢٦/٣/١١)

□ ملخّص □

يهدف البحث إلى تصميم وتنفيذ نظام متكامل يعتمد على تقنيات الذكاء الاصطناعي باستخدام الشبكات العصبونية الاصطناعي ANN والشبكات العصبونية الاحتمالية PNN في عملية كشف وتشخيص الأعطال، ويرتكز في عمله على نظام تحصيل معطيات يقوم بجمع الإشارات الكهربائية الممثلة بجهد وتيار كل وحدة كهروضوئية بشكل لحظي.

تم بناء النظام بحيث يتضمن لوحين مترابطين: لوح حقيقي يحاكي الأداء الفعلي للنظام الكهروضوئي تحت ظروف التشغيل العملية، ولوح برمجي محاكي تم تصميمه برمجياً ليحاكي خصائص اللوح الحقيقي بدقة عالية من حيث قيم الجهد، التيار، والاستجابة الزمنية، مما يتيح دراسة الحالات التشغيلية والأعطال في بيئة آمنة ومضبوطة، و افتعال الأعطال الأساسية (دارة القصر، الدارة المفتوحة، التأريض) وربطها عبر أزرار مخصصة تتحكم مباشرة باللوحين المتوازيين، بحيث يمكن للنظام رصد وتسجيل التغيرات في البارامترات الفعلية والافتراضية في آنٍ واحد.

تعتمد عملية التشخيص على تحليل هذه البارامترات باستخدام الشبكات العصبونية الاصطناعية، حيث تم تدريب الشبكات على ٥٠ دورة تدريبية تضمنت ٥٠٠ عينة بيانات مقسّمة إلى ٣٥٠ عينة للتدريب ١٥٠ للاختبار. تم تدريب الشبكة العصبونية التنبؤية (ANN) على تحليل الأنماط وتوقّع الحالة التشغيلية، في حين استخدمت الشبكة الاحتمالية (PNN) لتصنيف نوع العطل وتحديد درجته، بلغت دقة النظام الإجمالية ٩١,٦٪، ودقة التشخيص التفصيلية لكل حالة على التوالي: القصر ٩٦٪، السليم ٩٧٪، الفتح ٨٨٪، التأريض ٩٠٪.

تمت المراقبة بالزمن الحقيقي باستخدام تقنية إنترنت الأشياء IOT من خلال ربط النظام المصمم مع منصة Telegram التي تقوم بعرض القراءات اللحظية لكل من الجهد، التيار، درجة الحرارة، وحالة النظام، وإرسال تنبيه فوري في حال حدوث أي عطل، مع **زمن استجابة كلي يقدر بـ ٢,٣ ثانية** بدءاً من قراءة القيم من الحساسات حتى إرسال التنبيه عبر المنصة.

الكلمات المفتاحية: تشخيص الأعطال، الألواح الكهروضوئية، الشبكة العصبونية ANN، الشبكة العصبونية PNN، نظام مراقبة ذكي، إنترنت الأشياء IOT، الآردوينو، MATLAB.

*أستاذ مساعد في كلية الهندسة التقنية، قسم تقانات الطاقات المتجددة، جامعة طرطوس، طرطوس – سوريا.

**طالبة دراسات عليا (ماجستير)، قسم تقانات الطاقات المتجددة كلية الهندسة التقنية، جامعة طرطوس، طرطوس – سوريا.

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٥) ٢٠٢٦

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (5) 2026

Detecting and diagnosing faults in photovoltaic modules using Neural Networks and monitoring them via Internet of Things IOT technology

Dr. Safaa Alahmad *
Raneem Moustafa **

(Received 22/1/2026 . Accepted 11/3/2026)

□ ABSTRACT □

The proposed system relies on Artificial Intelligence Techniques using Artificial Neural Networks ANN and Probability Neural Networks PNN in the process of fault detection and diagnosis and employs a comprehensive data acquisition system that continuously measures the voltage and current signals of each PV module. The implementation includes two interconnected platforms: a physical hardware module**,** representing the real photovoltaic behavior under practical conditions, and a software-simulated module designed to replicate the electrical and dynamic response characteristics of the real system. This hybrid design enables controlled fault simulation and dual-layer data analysis under safe conditions.

Main fault types were introduced (short circuit, open circuit, grounding) through dedicated control buttons that simultaneously affect both the hardware and the simulated module, allowing synchronized acquisition of actual and virtual signals. Neural networks were trained on 50 training epochs containing 500 samples (350 for training and 150 for testing). The predictive ANN model was used for operational state estimation, while the probabilistic PNN model classified fault types. The system achieved an overall diagnostic accuracy of 91.6%**,** with detailed accuracy rates of 96% for short circuit, 97% for normal, 88% for open circuit, and 90% for grounding, and a total response time of 2.3 seconds from data acquisition to alert transmission.

Real-time monitoring was done using Internet of Things (IoT) technology by connecting the designed system with Telegram's platform**,** which provides live visualization of voltage, current, temperature, and fault status, along with instant alert notifications in case of any malfunction.

Keywords: Fault diagnosis, photovoltaic panels, Artificial Neural Network (ANN), Deep Neural Network (DNN), Internet of Things (IOT), intelligent monitoring system, MATLAB.

*Assistant Professor, Faculty of Technical Engineering, Department of Renewable Energy Technologies, Tartous University, Syria.

**Postgraduate Student (Master), Department of Renewable Energy Technologies, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Syria.

١- المقدمة

تعتبر عملية تشخيص الأعطال أمر بالغ الأهمية للحفاظ على القدرة التنافسية لقطاع الطاقة، ولاسيما الوحدات الكهروضوئية التي تتعرض لاضطرابات متعددة منها عوامل جوية خارجية أو أعطال داخلية مختلفة مما يؤثر على استقرار النظام ويقلل من الكفاءة والإنتاج فيمكن أن يؤدي الكشف الفعال والدقيق لأعطال الوحدات إلى حمايته وضمان التشغيل الآمن (Kebir 2021)، (Boubakr, 2022).

وتعتبر الشبكات العصبونية أداة قوية لتعزيز كفاءة واستدامة قطاع الطاقة حيث تمثل هذه التقنية حلاً واعداً لزيادة كفاءة أنظمة الطاقة المتجددة وزيادة عمرها وتقليل تكاليف صيانتها، ما يميز الشبكات العصبونية الاصطناعية هو مرونتها وقدرتها العالية على التعامل مع البيانات غير الخطية والمعقدة، الأمر الذي جعلها أداة فعالة في مجموعة واسعة من التطبيقات العملية والعلمية مثل التعرف على الصور والأصوات، معالجة اللغة الطبيعية، التنبؤ بالبيانات، وغيرها من المجالات، وبفضل بنيتها التكيفية وإمكانية تدريبها على مجموعات كبيرة من البيانات، أصبحت الشبكات العصبونية من الركائز الأساسية في تطوير أنظمة ذكية قادرة على محاكاة جوانب التفكير البشري(Abubakar, 2023), (Senthil, 2024).

كما إن لتقنية إنترنت الأشياء أهمية كبيرة في قطاع الطاقة حيث توفر الكثير من البيانات الدقيقة والتحكم الذي كان مستحيلاً في السابق(Kumar, 2018).

تعتبر العلاقة بين تقنية إنترنت الأشياء وتقنية الذكاء الاصطناعي وثيقة جداً فعند دمج الشبكات العصبونية مع تقنية إنترنت الأشياء يمكن تحسين أداء جميع الأنظمة الكهروضوئية الموجودة والتحكم بالعمليات الألية بالإضافة إلى المراقبة الدائمة للوحدات بالوقت الفعلي. لذلك ازداد التركيز في الآونة الأخيرة على إجراء العديد من البحوث والدراسات النظرية والتجريبية فيما يخص تشخيص الأعطال الكهروضوئية ومراقبتها من خلال تقنيات الذكاء الاصطناعي AI وإنترنت الأشياء IOT، ومن هذه الدراسات:

-**اقترح الباحث (Ahmad Abubakar.٢٠٢٣) وآخرون** من قسم الهندسة الكهربائية (Abubaka, 2023)، في البرازيل، طريقة جديدة للكشف عن الأعطال في المصفوفات الكهروضوئية من خلال تنفيذ خوارزمية تقسيم الشبكة ANFIS GP وخوارزمية التجميع الطرحي ANFIS SC فهذا النهج يدرب خوارزمية الاستدلال الغامض ANFIS لنظام موثوق للكشف عن العيوب الكهروضوئية وتصنيفها.

أظهرت النتائج: تفوق تقنية ANFIS SCعلى تقنية ANFIS GP من حيث التحديد الدقيق لحالات الخطأ.

-**عرض الباحثون (Nallapaneni Manoj Kumar, Karthik Atluri.٢٠١٨)** من كلية الهندسة الكهربائية والالكترونية من جامعة ماليزيا (Kumar, 2018)، في هذا البحث، نظام استخدام تقنية إنترنت الأشياء لتحقيق كفاءة الطاقة في الأنظمة الكهروضوئية ولنقل البيانات عن بعد من المحطة إلى المستخدم، يستخدم النظام المطبق واجهة قائمة على وحدة تحكم الويب والأجهزة اللاسلكية التي تستهلك كميات قليلة من الطاقة، توضح هذه الطريقة النتائج المرضية في مراقبة بارامترات النظام الكهروضوئي.

أوضحت النتائج:

- تقلل تقنية IOT من المهمة المتمثلة في زيارة موقع الوحدات الكهروضوئية بشكل متكرر وتسجيل بيانات الأداء ومراقبة الأعطال، يتيح إمكانية التسجيل المستمر لبيانات الأداء وبيانات الفشل التي يمكن تحليلها

للتنبؤ بإمكانات توليد الطاقة المستقبلية، تلعب هذه التقنية دوراً رئيسياً في الوصول إلى التحكم في أنظمة الطاقة الكهروضوئية المثبتة في المواقع النائية أو بعيداً عن مركز التحكم.

-**قدم الباحث (Sivagami.٢٠٢١)** وآخرون من معهد ساتياباما للعلوم والتكنولوجيا في الهند (Sivagami, 2021) بتقديم نظام يتم من خلاله مراقبة البارامترات الرئيسية لعمل النظام الكهروضوئي من درجة الحرارة والإشعاع الشمسي والبارامترات التشغيلية من جهد خرج الطاقة الكهروضوئية والتيار الكهروضوئي والتي تساعد في اتخاذ القرارات مثل ما إذا كان النظام يوفر طاقة موثوقة بالإضافة إلى التحقق مما إذا كان النظام يستخدم بشكل فعال أم لا، كما تم إجراء المراقبة باستخدام طريقتين (الطريقة التقليدية وتقنية إنترنت الأشياء).

وأوضحت النتائج ما يلي: يمكن لتقنية IOT معالجة حجم ضخم من البيانات في حين الطريقة التقليدية يكون التخزين والوصول من خلالها إلى البيانات محدود، وأيضاً يمكن من خلالها إزالة العطل من دون تدخل بشري حيث وقت إزالة العطل أقل ويمكن استخدام البيانات المجمعة لتحليل الطلب على الطاقة في المستقبل والتنبؤ به أما الطريقة التقليدية تحتاج إلى تدخل بشري للتنبؤ ومعرفة العطل حيث وقت إزالته يكون أطول.

-**قدم الباحثان (G. Karthikeyan, A. Jagadeeshwaran.2023)** في بريطانيا (Karthikeyan, 2023) دراسة في مجال التنبؤ بالأنظمة الكهروضوئية من خلال تقديم نموذج قائم على التعلم الآلي، تم استخدام العديد من الخوارزميات مع إجراء عملية المقارنة فيما بينهم مع تشخيص ٥ أنواع من الأعطال، **وأوضحت نتائج التشخيص:**

- الشبكة CNN بدقة تقدر ٨٥,٤% خلال وقت تدريب واختبار يقدر ١١٨,٣ ميلي ثانية.
- الشبكة DNN بدقة تقدر ٨٨,٤% خلال وقت اختبار وتدريب يقدر ب ٩٠,٠٩ ميلي ثانية.
- الشبكة SVM بدقة تقدر ٨٢,١% خلال وقت اختبار ١٣١,٠٩ ميلي ثانية.

٢-أهمية البحث، وأهدافه:

يسهم هذا البحث في الكشف والتشخيص التلقائي عن الأعطال في الوحدات الكهروضوئية بشكل مبكر وبالوقت الفعلي بدون أي حسابات معقدة أو نماذج رياضية لتفادي إلحاق الضرر بالأنظمة الكهروضوئية أو التأثير على إنتاجها وهذا يساعد على زيادة عمرها وتقليل تكاليف الصيانة، بالإضافة إلى مراقبة عملها عن بعد باستخدام تقنية إنترنت الأشياء IOT.

وعليه يهدف البحث إلى: كشف وتشخيص الأعطال في الوحدات الكهروضوئية من خلال بناء نظام تحصيل المعطيات وتحليل البارامترات الناتجة عنه عن طريق الشبكات العصبونية الاصطناعية ومراقبة آلية عملها عن طريق تقنية إنترنت الأشياء IOT بالزمن الحقيقي.

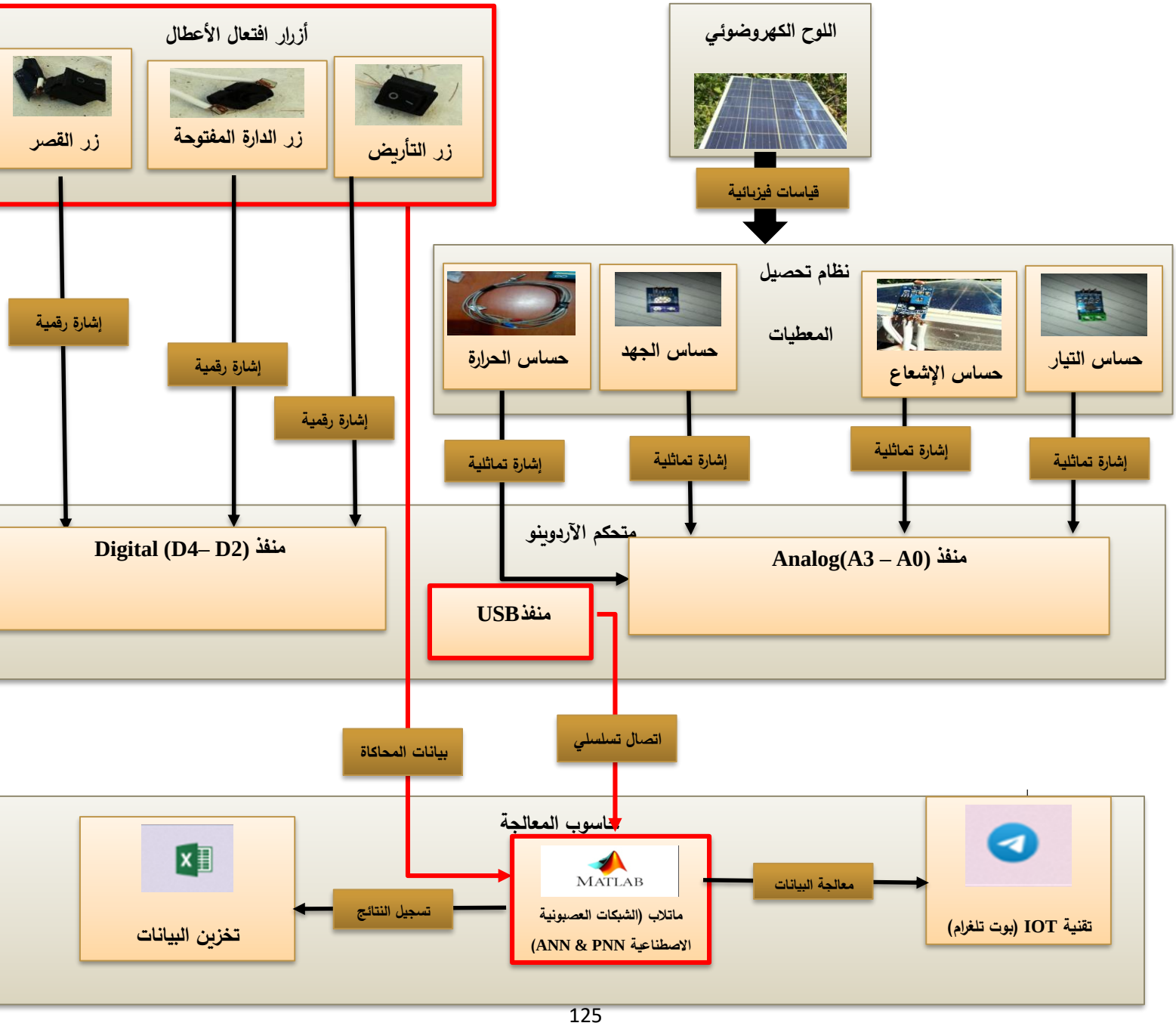
٣-طرائق البحث ومواده:

٣-١-المخطط الصندوقي للنظام المصمم:

تم تصميم نظام متكامل لكشف وتشخيص الأعطال كما هو مبين في الشكل (١)، حيث يعتمد النظام على قياس عدد من المتغيرات الكهربائية والبيئية المهمة، والمتمثلة في الجهد الكهربائي والتيار الكهربائي بالإضافة إلى شدة الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة للوحدات الكهروضوئية، ويتم جمع هذه البيانات باستخدام نظام تحصيل

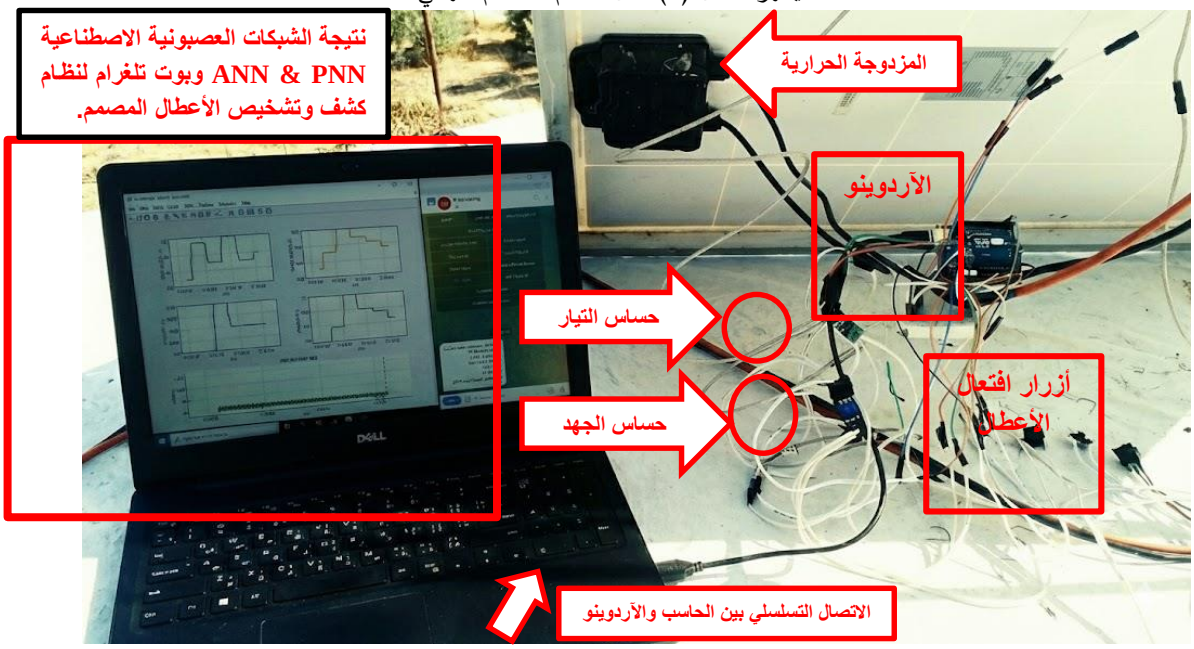
المعطيات المرتبط بوحدة تحكم دقيقة من نوع Arduino، والتي تتولى قراءة الإشارات الخارجة من الحساسات المستخدمة ومعالجتها آنياً.

بعد إجراء المعالجة الأولية، ترسل البيانات المقاسة إلى بيئة العمل MATLAB، حيث يتم تنظيمها وتخزينها بشكل منظم ضمن ملف Excel، وذلك بهدف توثيق الأداء التشغيلي للنظام ومتابعة حالته خلال فترات التشغيل المختلفة، وبعدها يتم تحليل البيانات المدخلة والمقاسة في الزمن الحقيقي باستخدام الشبكات العصبونية الاصطناعية، مما يتيح إمكانية كشف الأعطال الكهربائية وتشخيصها بدقة عالية، إضافة إلى إرسال تنبيهات فورية تعكس حالة النظام التشغيلية بشكل موثوق.



الشكل (١): المخطط الصندوقي لنظام كشف وتشخيص الأعطال المصمم.

يظهر الشكل (٢) شكل النظام المصمم النهائي:



الشكل (٢): الشكل النهائي لنظام كشف وتشخيص الأعطال المصمم.

٣-١-١-مكونات النظام المصمم:

٣-١-١-١-الألواح الكهروضوئية:

تم الاعتماد على نوعين من الألواح الكهروضوئية بغرض تحقيق دراسة أكثر شمولية لمختلف الحالات التشغيلية والأعطال:

- لوح شمسي حقيقي (eSUNNY Solar Module): من نوع eSUNNY 150-36P حيث يوضح الجدول (١) التالي أهم المواصفات الكهربائية والفيزيائية لهذا اللوح كما وردت في الملصق التعريفي:

الجدول (١): المواصفات الكهربائية والفيزيائية للوح الكهروضوئي المستخدم.

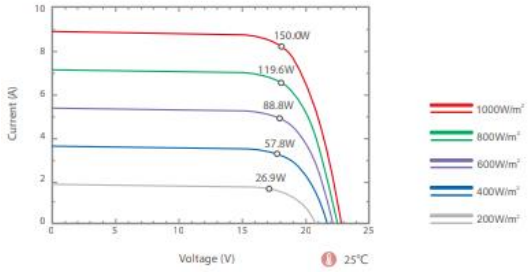
الملاحظة	القيمة	المواصفة
القدرة الاسمية عند شروط الاختبار القياسية	W١٥٠	القدرة القصوى (Pmax)
أقصى جهد ممكن عند عدم وجود حمل	V ٢٢,١٥	جهد الدائرة المفتوحة (Voc)
التيار الأعظمي عند قصر الدائرة	A ٨,٦٦	تيار القصر (Isc)
الجهد المقابل لأعلى نقطة قدرة	V ١٨,٥٥	جهد القدرة العظمى (Vmp)
التيار عند أعلى نقطة قدرة	A٨,١٥	تيار القدرة العظمى (Imp)
أعلى جهد مسموح للتوصيل على مستوى النظام	V١٠٠٠	الجهد الأعظمي للنظام

يظهر الشكل (٣) شكل اللوح الكهروضوئي المستخدم في الدراسة:



الشكل (٣): اللوح الكهروضوئي المستخدم في الدراسة.

يمثل الشكل (٤) منحني الجهد–التيار للوح الكهروضوئي في حالة العمل السليم، حيث يلاحظ السلوك غير الخطي الطبيعي للوح مع قيمة تيار قصر مرتفعة عند الجهد الصفري، وانخفاض تدريجي للتيار مع زيادة الجهد حتى الوصول إلى جهد الدارة المفتوحة، يشير هذا المنحني إلى أن الوحدة تعمل ضمن المجال الكهربائي الطبيعي المتوافق مع قيم الإشعاع ودرجة الحرارة، دون وجود أي انحراف يدل على حالة عطل.



الشكل (٤): منحني الفولت–أمبير للوح الكهروضوئي المستخدم في الدراسة.

○لوح برمجي (Virtual PV Panel): تم الاستعانة بلوح افتراضي ضمن بيئة المحاكاة يوفر اللوح البرمجي مرونة في التحكم بالمعاملات (Vmp, Isc, Voc, imp) ويتيح إجراء اختبارات دقيقة حول تأثير كل عطل على خرج المنظومة.

إن الدمج بين اللوح الحقيقي واللوح البرمجي أتاح تحقيق توازن بين الدقة العملية ومرونة التجارب، حيث تم اختبار المنظومة في بيئة واقعية من جهة، وفي بيئة محاكيه تسمح بفرض الأعطال والتحكم بالظروف من جهة أخرى مما ساعد على تحسين موثوقية النتائج ورفع دقة نظام التشخيص.

٣-١-١-٢-تصميم نظام تحصيل المعطيات:

يعد نظام تحصيل المعطيات أحد المكونات الأساسية في هذه الدراسة، إذ يشكل الحلقة الأولى في سلسلة الكشف والتشخيص الذكي للأعطال في الوحدات الكهروضوئية، وتتمثل وظيفته الأساسية في تحويل السلوك الكهربائي الحقيقي للوحدات الكهروضوئية إلى معطيات رقمية قابلة للمعالجة والتحليل الذكي.

في التطبيق العملي، يعتمد على مجموعة من الحساسات المرتبطة مباشرة باللوح الكهروضوئي، يقوم بقياس المتغيرات الفيزيائية والكهربائية الأكثر تأثيراً على أداء النظام، والمتمثلة بالجهد الكهربائي، التيار الكهربائي، شدة الإشعاع الشمسي، ودرجة حرارة اللوح الشمسي، كما يتم إرسال هذه القيم بشكل آني إلى المتحكم الدقيق Arduino والذي يتولى عملية أخذ العينات وإرسالها إلى بيئة ماتلاب للكشف والتشخيص.

يتكون نظام تحصيل المعطيات المستخدم:

١- **حساس الجهد (Voltage sensors):** يستخدم لقياس فرق الجهد الخارج من الألواح الشمسية، ويتيح هذا الحساس مراقبة التغيرات اللحظية في جهد الخرج وهو مؤشر مهم على الحالة التشغيلية للمنظومة، يبين الشكل (٥) حساس الجهد الذي تم استخدامه في التطبيق العملي.



الشكل (٥): حساس الجهد (Voltage sensors).

٢- **حساس التيار (Current sensor)**: يبين الشكل (٦) حساس التيار المستخدم في البحث والذي يحول شدة التيار إلى إشارة جهد خطية قابلة للمعالجة، كما أن مراقبة التيار تتيح الكشف عن حالات مثل القصر الجزئي أو الانخفاض غير الطبيعي الناتج عن التلوث أو العوامل البيئية.



الشكل (٦): حساس التيار (Current sensor).

٣- **حساس الحرارة (Temperature Sensor)**: تم استخدام المزدوجة الحرارية المبينة في الشكل (٧) لقياس درجة الحرارة سطح اللوح، تأتي أهمية هذا الحساس في أنه عند ارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى انخفاض الجهد الناتج عن الخلايا الشمسية مما يجعله متغيراً أساسياً يجب مراقبته لتشخيص الأداء.



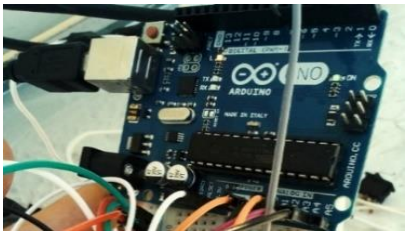
الشكل (٧): حساس الحرارة (Temperature Sensor).

٤- **حساس الإشعاع الشمسي (Solar Irradiance Sensor –LDR)**: تم الاستعانة بمقاومة ضوئية مبينة في الشكل (٨) لتمثيل شدة الإشعاع الشمسي بشكل نسبي، حيث عند تعرضها للضوء تتناقص مقاومتها وبالتالي يتغير الجهد عبرها، مما يسمح بتقدير شدة الإشعاع الشمسي الساقط على اللوح.



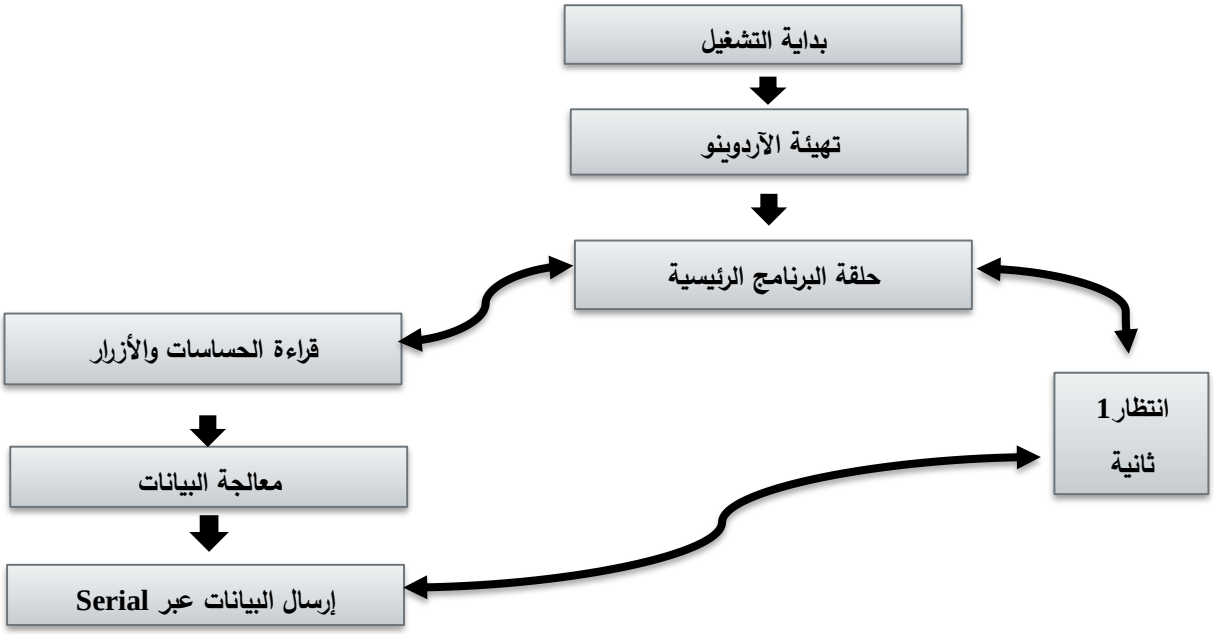
الشكل (٨): حساس الإشعاع الشمسي (Solar Irradiance Sensor –LDR).

٥- **المتحكم الدقيق الآردوينو**: يبين الشكل (٩) وحدة التحكم الدقيقة **Arduino Uno** المستخدمة في البحث والتي تقوم بتحويل البارامترات إلى بيانات رقمية وترسلها إلى بيئة MATLAB عبر المنفذ التسلسلي (USB Serial communication) بسرعة ٩٦٠٠، حيث أن عملية جمع البيانات من الحساسات يتم تنفيذها بمعدل عينة واحدة كل ثانية.



الشكل (٩): وحدة التحكم الدقيقة (Arduino Uno) المستخدمة.

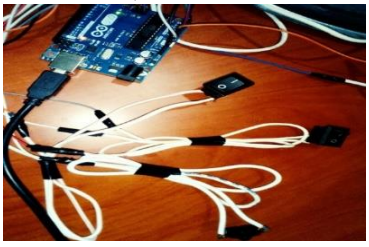
ومن خلال المخطط (١٠) تتبين آلية عمل المتحكم الآردوينو في إرسال واستقبال البيانات.



الشكل (١٠): آلية عمل الآردوينو في إرسال واستقبال البيانات.

٣-١-١-٣-افتعال الأعطال الكهربائية:

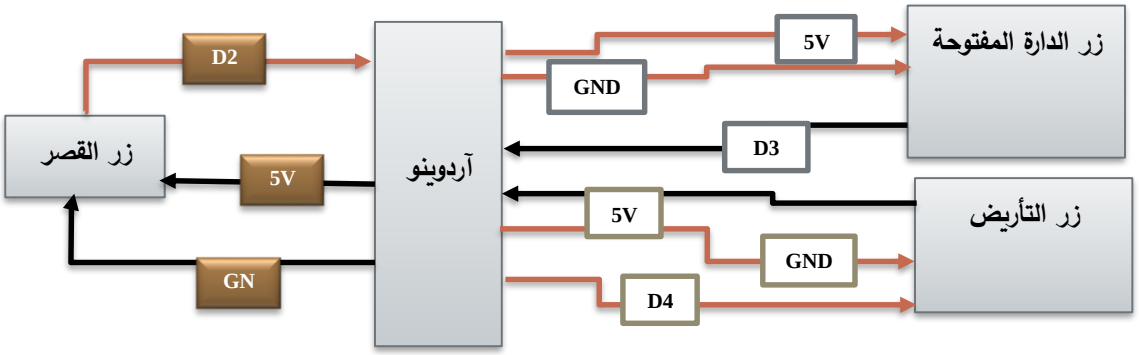
تم افتعال الأعطال حسب الطريقة المعتمدة بالمخابر الاحترافية لمحاكاة العطل عبر الآردوينو وذلك باستخدام ثلاث أزرار مبينة في الشكل (١١) حيث أن كل زر مسؤول عن عطل معين، تم تشخيص ثلاث أنواع من الأعطال (الدارة المفتوحة، التأريض، القصر)، حيث أن كل زر متصل مع متحكم الآردوينو الذي يغير القيمة الفعلية الحقيقية القادمة من الحساسات بحيث تعكس شكل العطل الحقيقي وأثره الكهربائي وهذه القيم محسوبة وفق منحنيات الأداء (الفولت–أمبير) كما في الشكل (٤) للوح المستخدم.



الشكل (١١): الأزرار المستخدمة لافتعال الأعطال برمجياً في النظام المستخدم.

تم افتعال الأعطال برمجياً لأن الشبكات العصبونية الاصطناعية تحتاج إلى عشرات السيناريوهات للتدريب والاختبار وبالتالي الافتعال البرمجي يعمل على إغناء شبكة التدريب المستخدمة بصور متعددة عن كل عطل.

يوضح الشكل (١٢) مخطط توصيل كل زر من الأزرار مع متحكم الآردوينو المستخدم.



الشكل (١٢): مخطط توصيل كل زر من الأزرار مع متحكم الآردوينو المستخدم.

هذه المنهجية ليست بديلاً عن الاختبار على الأنظمة الحقيقية، بل هي مكملة ومهيأة له، تسمح بإجراء اختبارات مكثفة أولية قبل الانتقال لمرحلة الاختبار على أنظمة حقيقية، وهو خيار تصميم مدروس يعتمد على منهجية المعترف بها عالمياً(HIL) Hardware in the loop في الأوساط الأكاديمية والصناعية والتي تمثل بيئة تحكم شديدة الدقة تسمح باختبار النظام تحت ظروف مختلفة دون مخاطرة (Karthikeyan, 2019). ,(AlMhdawi, 2019)

٣-٢ -الجزء البرمجي للنظام المصمم:

٣-٢-١-برمجة وحدة التحكم Arduino:

اعتمدت الدراسة على برمجة لوحة الآردوينو لتكون الحلقة الوسطى بين الجانب العتادي والجانب البرمجي، إذ تتولى مهمة قراءة القيم من الحساسات، محاكاة الأعطال المختلفة برمجياً، ثم نقل البيانات بشكل منظم إلى بيئة ماتلاب، صممت خوارزمية العمل بحيث تحقق الأهداف التالية:

١- قراءة القيم من الحساسات: قراءة الجهد من اللوح الشمسي عبر حساس الجهد، قراءة التيار باستخدام حساس التيار الموصول على خرج اللوح، تسجيل درجة الحرارة بواسطة المزدوجة الحرارية، قياس شدة الإشعاع الشمسي باستخدام LDR.

٢- محاكاة الأعطال برمجياً: عطل القصر: ضبط الجهد على قيم قريبة من الصفر وزيادة التيار ليحاكي تيار القصر، عطل فتح الدائرة: جعل التيار صفراً ورفع الجهد نحو Voc، عطل التأريض: تخفيض الجهد والتيار معاً لمحاكاة تسرب الطاقة إلى الأرض.

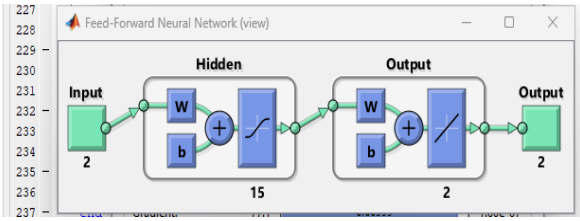
٣- إرسال البيانات عبر المنفذ التسلسلي: تجميع القيم المقروءة في صيغة قياسية تشمل درجة الحرارة، الإشعاع، التيار، الجهد، ترسل البيانات إلى ماتلاب باستخدام منفذ Serial بسرعة نقل ٩٦٠٠- ١١٥٢٠٠ Baud، يتم تضمين معرف العطل الذي يحدد حالة النظام (٠ طبيعي، ١ قصر، ٢ فتح، ٣ تأريض).

٣-٢-٢-الشبكة العصبونية الاصطناعية الأولى ANN (Artificial Neural Network) للتنبؤ بالقيم المثالية:

يبين الشكل (١٣) هيكل الشبكة، حيث الهدف من هذه الشبكة هو التعلم من العلاقات الفيزيائية بين المتغيرات البيئية (درجة الحرارة، شدة الإشعاع الشمسي) وبين المخرجات الكهربائية المثالية للوح الكهروضوئي (الجهد، التيار).

✓ تم تدريب الشـــبكة باســـتخدام قاعدة بيانات موســـعة تضـــم قياســـات واقعية ونماذج محاكيه للظروف المختلفة.

✓ دخلت الشبكة المتغيرات البيئية بعد معالجتها وتطبيعها إحصائياً، وخرجت القيم المتوقعة للجهد والتيار عند الحالة السليمة.

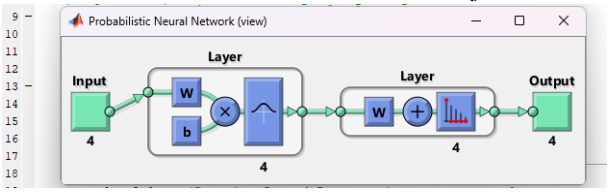


الشكل (١٣): هيكل الشبكة العصبونية الاصطناعية ANN ضمن بيئة ماتلاب.

٣-٢-٣-الشبكة العصبونية الاحتمالية PNN (Supervised Neural Networks) للتصنيف الفوري للأعطال:

بعد الحصـــول على القيم المتوقعة من الشـــبكة الأولى، يتم إدخالها مع القيم المقاســـة فعلياً إلى شـــبكة PNN، والتي جرى تدريبها لتقوم بعملية تصـــنيف احتمالي لحالة اللوح: حالة طبيعية: توافق جيد بين القيم المتوقعة والقيم المقاســـة، قصـــر كهربائي: انخفاض شـــديد في الجهد مع بقاء التيار مرتفعاً، دائرة مفتوحة: انعدام التيار مع بقاء الجهد قريباً من قيمته الاسمية، عطل أرضي: انخفاض في كل من الجهد والتيار ضمن نسب محددة.

تتميز شـبكة PNN بسـرعة اسـتجابتها وعدم حاجتها إلى تدريب طويل عند إضـافة أمثلة جديدة، مما يجعلها مناسـبة جداً للتطبيقات الفورية تتطلب اتخاذ قرار لحظي والشكل (١٤) يبين هيكلها.



الشكل (١٤): هيكل الشبكة العصبونية الاصطناعية PNN ضمن بيئة ماتلاب.

❖ **تحليل مصفوفة الارتباك للشبكة PNN:**

تم استخدام مصفوفة الارتباط (Confusion Matrix) المبينة في الشكل (١٥) لتقييم أداء الشبكة العصبونية الاحتمالية في عملية الكشف والتصنيف الآني لأنواع الأعطال ضمن النظام الكهروضوئي.



الشكل (١٥): مصفوفة الارتباك للشبكة العصبونية الاحتمالية PNN.

نلاحظ من الشكل السابق أن القطر المائل من اليسار إلى اليمين يمثل الحالات التي جرى تصنيفها بشكل صحيح أي عندما تطابق الخرج مع الهدف الحقيقي، بينما تشير القيم خارج القطر إلى الحالات التي حصل فيها سوء تصنيف نتيجة التشابه بين خصائص إشارات الأعطال المختلفة.

تبين الألوان المختلفة في المربعات (الأخضر، الوردي، الأزرق) نسب الدقة والانحراف بحيث تشير المناطق الخضراء إلى مناطق التصنيف الصحيح ذات الدقة العالية، في حين تعبر المربعات ذات اللون الوردي عن الحالات التي حدث فيها التباس بين صنفين متقاربين.

٣-٣-مراقبة النظام المصمم باستخدام تقنية إنترنت الأشياء IOT:

تم اعتماد مفهوم إنترنت الأشياء في هذا البحث بهدف تحقيق المراقبة المستمرة في الزمن الحقيقي لأداء الوحدات الكهروضوئية، تم إنشاء بوت على تطبيق Telegram ليعمل كواجهة تفاعلية بين نظام كشف وتشخيص الأعطال والمستخدم النهائي. في التطبيق العملي، يستقبل البوت التنبيهات الصادرة عن المتحكم الدقيق الآردوينو بعد تنفيذ عملية التشخيص، سواء كانت حالة عمل سليم أو وجود أحد الأعطال الكهربائية (قصر، فتح، تأريض).

يتم إرسال هذه التنبيهات بشكل فوري اعتماداً على نتائج المعالجة والتحليل، مما يتيح للمستخدم الاطلاع المباشر على حالة الوحدات الكهروضوئية دون الحاجة إلى التواجد الفيزيائي بالقرب من اللوح، حيث ينقل النتائج النهائية بشكل واضح مما يعزز موثوقية النظام المصمم ويزيد من مرونته.

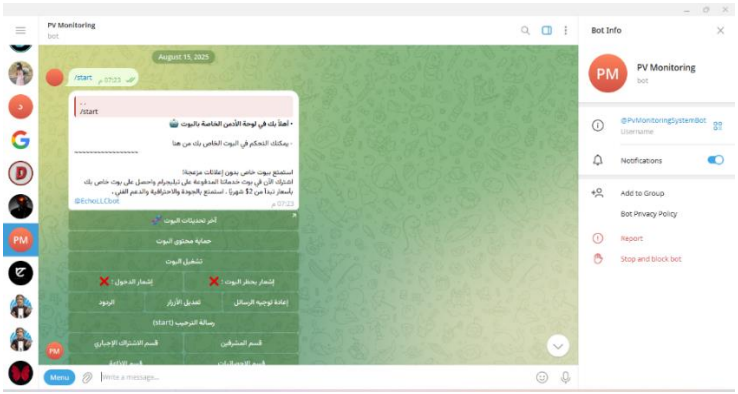
٣-٣-١-إنشاء بوت تلغرام Telegram bot:

لإتاحة التواصل اللحظي مع المستخدم، تم الاعتماد على تطبيق تلغرام الذي يوفر واجهات برمجية تسمح بإرسال واستقبال الرسائل بشكل أوتوماتيكي، تم إنشاؤه وفق الخطوات التالية على تطبيق تلغرام:

١- نقوم بإدخال المصطلح BOT Father ثم نختار صانع البوت ثم ننقر علىStart.

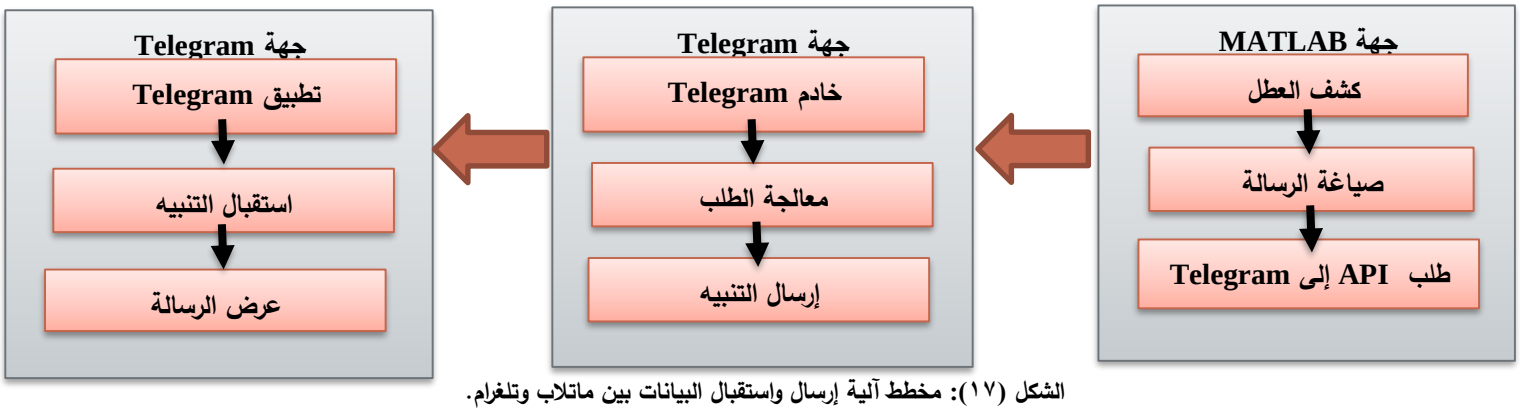
٢- يرسل البوت ضمن المحادثة رسالة تعريف تتضمن New Bot، نقوم بإدخال اسم البوت " PV Monitoring"ثم إرسال، بعدها إدخال اسم المستخدم الخاص بالبوت PvMonitoringSystemBot، بعدها يرسل البوت رسالة رمز Token. نقوم بإدخال المصطلح "@mkfrbot" ثم إرسال، فتفتح نافذة جديدة لتهيئة البوت المنشأ يتم تحديد لغة البوت نختار نوع البوت الذي نقوم بتصميمه والذي يتمثل بالنوع "تواصل".

٣- نقوم بعد ذلك بلصق رمز Token الذي قمنا بنسخه سابقاً، فيرسل صانع البوت رسالة فيها معرف البوت وبالنقر عليه نكون قد أصبحنا ضمن الواجهة الخاصة بالبوت الذي قمنا بتصميمه كما في الشكل (١٦).



الشكل (١٦): الواجهة الخاصة بالبوت المصمم.

يوضح المخطط (١٧) آلية إرسال واستقبال البيانات بين جهة MATLAB وجهة تلغرام:



الشكل (١٧): مخطط آلية إرسال واستقبال البيانات بين ماتلاب وتلغرام.

٣-٤-اختبار النظام المصمم ومناقشة النتائج:

٣-٤-١-اختبار النظام المصمم:

تم اختبار النظام لمدة شهر كامل تبين من خلاله مدى دقة وكفاءة التصميم والتشخيص، تم قياس البارامترات بالوقت الفعلي بمعدل عينة واحدة كل ثانية وبالتالي تم الحصول على عدد كبير جداً من البارامترات التي ساعدت في إثبات دقة وكفاءة النظام المصمم.

تم الاعتماد على بيئة ماتلاب في تسجيل وتخزين جميع البارامترات، والتي تتمثل بالتوقيت الزمني الذي تم تسجيل البيانات فيه، درجة الحرارة المؤثرة على الألواح، والإشعاع الشمسي الساقط على الألواح المتمثل بقيمة المقاومة الضوئية بالإضافة إلى جهد وتيار الألواح وأخيراً حالة النظام هل هو بحالة عمل سليم أو بحالة عطل (قصر، فتح، تأريض)، والجدول (2) يبين عينة من عملية تسجيل البيانات والبارامترات ضمن ملف **Excel**التي تمت في بيئة ماتلاب وباستخدام نظام تحصيل المعطيات.

الجدول (٢): البيانات المسجلة في ملف Excel.

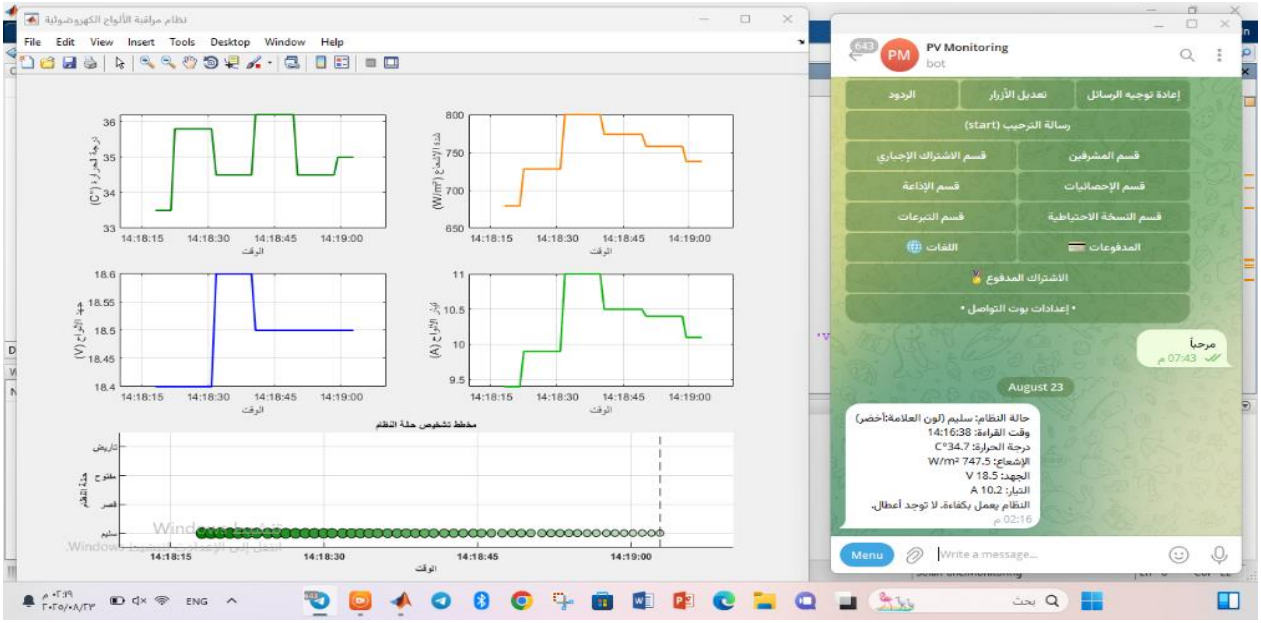
Time	Temperature (C)	Light (W/m2)	Voltage (V)	Current (A)	Fault Type
14:39:13	34.7	747.5	18.5	10.2	سليم
14:39:20	34.7	747.5	18.5	10.2	سليم
14:39:21	34.7	747.5	18.5	10.2	سليم
14:41:17	35	754.5	2	20	قصر
14:41:20	35	754.5	2	22	قصر
14:41:21	35	754.5	2	21	قصر
14:43:46	34.7	662.5	22	0	مفتوح
14:43:48	34.5	706.5	22	0	مفتوح
14:43:49	34.5	706.5	23	0	مفتوح
14:46:19	35.2	814.5	12	6	تأريض
14:46:21	35.2	814.5	11	4	تأريض
14:46:22	35.2	814.5	12	6	تأريض

بالنسبة لنتائج التطبيق العملي والتي تبين تسلسل العملية بين تطبيق ماتلاب وتطبيق التلغرام، حيث أن الواجهة الموجودة على اليسار (الموجود فيها المخططات) تابعة لتطبيق ماتلاب، أما الواجهة الموجودة على جهة اليمين (المحادثة مع بوت التلغرام) تابعة لتطبيق الماتلاب.

واجهة تطبيق ماتلاب تحتوي على مخططات خاصة بدرجة الحرارة، الإشعاع الشمسي، التيار، الجهد المأخوذين من نظام تحصيل المعطيات، وعبر متحكم الآردوينو الذي تم برمجته بكود برمجي مناسب لتنفيذ هذه العملية تم إيصال القيم إلى بيئة ماتلاب ليتم تشخيص وكشف الأعطال بالإضافة إلى إرسال رسالة إلى تطبيق التلغرام، يتم إرسال الرسالة في الوقت الفعلي والتي تتضمن معلومات عن حالة النظام هل هو بحالة عمل طبيعي أو بحالة عطل (قصر–دارة مفتوحة–تأريض) بالإضافة إلى لون علامة حالة الوحدات الكهروضوئية التي تظهر ضمن مخططات بيئة ماتلاب على شكل دوائر والتي تعتبر إشارة عن حالة العمل الطبيعي أو حالة العطل حيث لكل حالة لون معين: العلامة الحمراء تدل على عطل القصر، العلامة الصفراء تدل على عطل الدارة المفتوحة، الدوائر البنفسجية تدل على عطل التأريض، بينما الدوائر الخضراء تدل على حالة العمل الطبيعي والسليم.

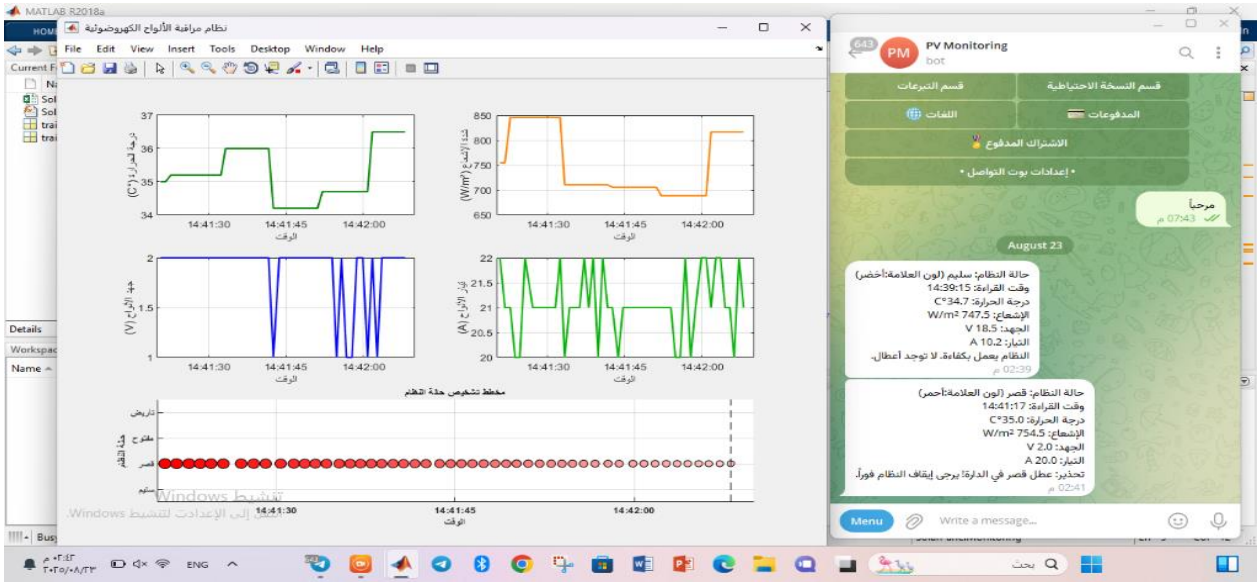
يبين الشكل (١٨) نتائج نظام تحصيل المعطيات ومعالجتها في **حالة العمل السليم للوحدات الكهروضوئية**، حيث يتضمن عدة مخططات زمنية ناتجة عن قراءات الحساسات ومعالجتها ضمن بيئة ماتلاب، إضافة إلى واجهة الإشعار عبر تطبيق تلغرام، يظهر مخطط الإشعاع الشمسي (المنحني العلوي الأيسر) تغير شدة الإشعاع الشمسي مع الزمن على شكل مستويات متدرجة، ويلاحظ أن التغيرات في الإشعاع تتم بشكل طبيعي ومتوقع دون انقطاعات مفاجئة أو قيم غير منطقية مما يعكس ظروف تشغيل بيئية طبيعية، أما مخطط درجة الحرارة (المنحني العلوي الأيمن) يبين تغير درجة حرارة اللوح الكهروضوئي مع الزمن، حيث نلاحظ أن درجة الحرارة تتغير تدريجياً وضمن المجال الحراري المسموح به للوح، دون ارتفاعات أو انخفاضات حادة قد تشير إلى خلل أو عطل حراري.

يظهر مخطط الجهد الكهربائي (المنحني السفلي الأيسر) سلوكاً مستقراً نسبياً مع تغيرات طفيفة متزامنة مع تغير درجة الحرارة، حيث يتأثر الجهد بشكل محدود بالظروف البيئة ويبقى قريباً من قيمه الاسمية في حالة العمل السليم، بينما مخطط التيار الكهربائي (المنحني السفلي الأيمن) يوضح تغير التيار الناتج عن اللوح مع الزمن، حيث نلاحظ ارتباطاً واضحاً بين التيار وشدة الإشعاع الشمسي فعند ارتفاع الإشعاع يرتفع التيار وعند انخفاضه ينخفض دون تسجيل أي انقطاعات مفاجئة مما يدل على سلامة الدارة الكهربائية، بينما مخطط ناتج التشخيص (المنحني السفلي الممتد) يمثل ناتج نظام التشخيص المعتمد على الشبكات العصبونية على شكل دوائر باللون الأخضر، ويؤكد ذلك أن النظام لم يفسر التغيرات الطبيعية في الإشعاع ودرجة الحرارة على أنها أعطال كهربائية، بينما تظهر واجهة تطبيق تلغرام على يمين الشكل رسالة واضحة توضح نتيجة التشخيص المتمثلة بنوع حالة النظام وزمن قراءة الحساسات وقيمة البارامترات المقاسة بالإضافة إلى التنبيه المختصر: النظام يعمل بكفاءة، لا توجد أعطال، وهذا يعكس التكامل بين نظام تحصيل المعطيات، خوارزمية التشخيص، ونظام الإشعارات، ويؤكد عمل النظام بشكل متكامل وفي الزمن الحقيقي.



الشكل (١٨): نتيجة التطبيق العملي في حالة العمل السليم.

أما في حالة عطل القصر الكهربائي المبينة في الشكل (١٩) التيار يرتفع بشكل غير طبيعي مقارنة بالحالة السليمة بينما ينخفض الجهد بشكل واضح على الرغم من أن منحنيات الإشعاع ودرجة الحرارة تبقى قريبة من القيم الطبيعية، هذا السلوك يظهر بوضوح في منحنيات الجهد والتيار حيث تنكسر العلاقة الطبيعية بينهما، ويصبح التيار أعلى من المتوقع عند نفس ظروف الإشعاع وبالتالي يتم تفسير هذا الانحراف في منحنيات الفولت–أمبير على أنه عطل قصر كهربائي وليس نتيجة لتغيرات بيئية، وفي مخطط ناتج التشخيص يكون على شكل دوائر بلون أحمر وتبقى الدوائر موجودة وممتدة لحين تطبيق عطل أخر أو عودة النظام إلى حالة العمل السليم، ويظهر في واجهة تلغرام على شكل رسالة محتواها حالة النظام، بارامترات الحساسات المقاسة، بالإضافة إلى رسالة التحذير: عطل قصر في الدارة! يرجى إيقاف النظام فوراً.



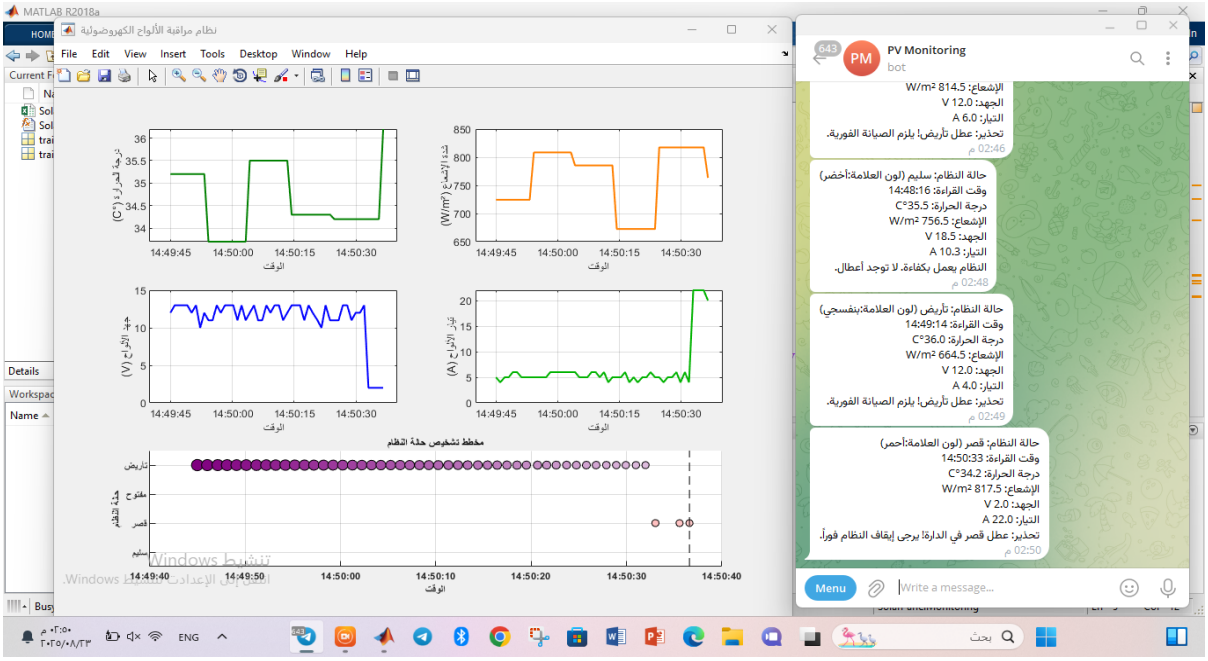
الشكل (١٩): نتيجة التطبيق العملي في حالة عطل القصر الكهربائي.

الشكل (٢٠) يبين **العمل في حالة الدارة المفتوحة** حيث أن الجهد يرتفع ليقترب من قيمة جهد الدارة المفتوحة في حين ينخفض التيار إلى قيم شبه معدومة، وعلى الرغم من ثبات الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة إلا أن منحني التيار لا يستجيب لهذه القيم مما يدل على وجود انقطاع في المسار الكهربائي كما أنه يظهر في مخطط ناتج التشخيص لحالة النظام على شكل دوائر بلون أصفر وتبقى مستمرة لحين تغيير حالة الوحدات الكهروضوئية مرة أخرى، أما رسالة بوت تلغرام مكونة من حالة النظام وزمن قراءة الحساسات وقيمة البارامترات المقاسة بالإضافة إلى التنبيه المختصر: دارة مفتوحة! يرجى فحص الوصلات والأسلاك.



الشكل (٢٠): نتيجة التطبيق العملي في حالة الدارة المفتوحة.

في حالة عطل التأريض المبين في الشكل (٢١) نلاحظ انخفاضاً جزئياً في الجهد والتيار دون الوصول إلى القيم الصفرية أو القصوى مع بقاء منحنيات الإشعاع والحرارة ضمن المجال الطبيعي، يشير هذا السلوك إلى تسرب جزء من التيار إلى الأرض مما يؤدي إلى تشوه تدريجي في منحنيات الجهد والتيار مقارنة بالحالة السليمة يظهر في مخطط ناتج التشخيص على شكل دوائر باللون البنفسجي، في حين أن رسالة واجهة تلغرام كانت تتمثل بحالة النظام وقيمة البارامترات المقاسة من نظام تحصيل المعطيات بالإضافة إلى زمن قراءة البارامترات والتحذير الذي يتمثل: عطل تأريض! يلزم الصيانة الفورية.



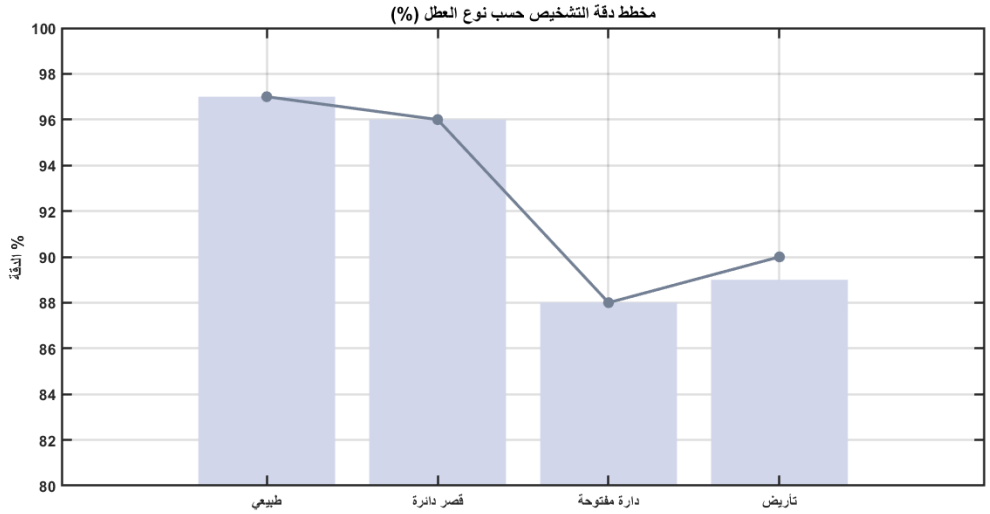
الشكل (٢١): نتيجة التطبيق العملي في حالة عطل التأريض.

٣-٤-2-دقة النظام المصمم:

٣-٤-2-1-مخطط دقة التشخيص حسب نوع العطل:

في الشـــكل (٢٢) تبين أن الشـــبكة حققت أعلى دقة في التعرف على الحالة الســـليمة إذ بلغت ٩٧%، تم تشـــخيص ١٥٠ قيمة من قراءات الحســـاســـات على أنها حالة عمل ســـليم نجح منها في التشـــخيص ١٤٦ قيمة فكانت نســـبة الدقة **Accuracy = (146/150) * 100 = 97%**، أما في حالة القصـــر كانت دقة التشـــخيص لهذا النوع من الأعطال ٩٦%، تم تشـــخيص ١٥٠ قيمة من قراءات الحســـاســـات على أنها حالة عطل قصـــر نجح منها في التشـــخيص ١٤٥ قيمة فكانت نســـبة الدقة **Accuracy = (145/150) * 100 = 96%**، بالنســـبة لعطل الدارة المفتوحة بلغت دقة التشـــخيص لهذه الحالة ٨٨%، تم تشـــخيص ١٥٠ قيمة من قراءات الحســـاســـات على أنها حالة عطل الدارة المفتوحة نجح منها في التشـــخيص ١٣٢ قيمة فكانت نســـبة الدقة **Accuracy = (132/150) * 100 = 88%**، أما حالة التأريض فقد حققت دقة ٩٠%، تم تشـــخيص ١٥٠ قيمة من قراءات الحســـاســـات على أنها حالة عطل الدارة المفتوحة نجح منها في التشـــخيص ١٣٥ قيمة فكانت الدقة **Accuracy = (135/150) * 100 = 90%** = وبالتالي فأن دقة النظام ككل تقدر ٩١,٦% تم تشـــخيص ٤٥٨ عينة صـــحيحة من أصل ٥٠٠ عينة وبالتالي الدقة

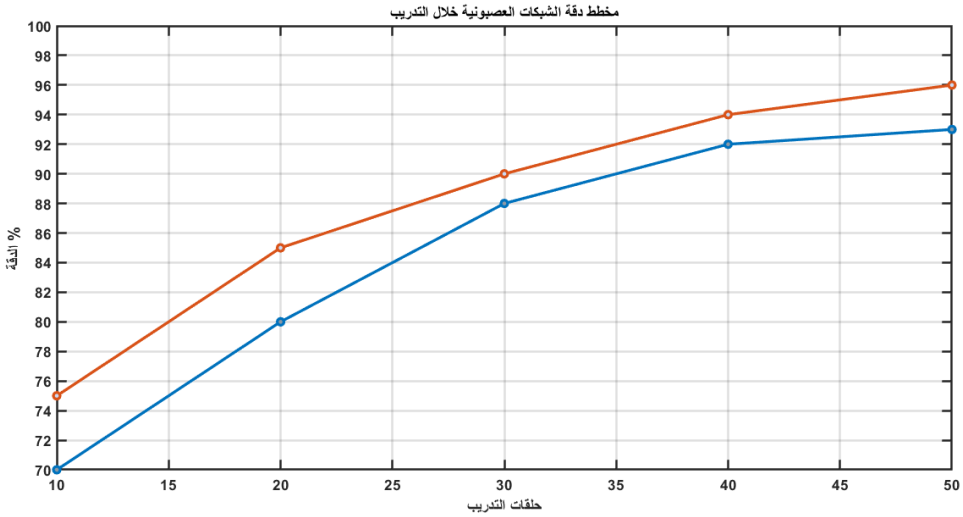
Accuracy = (458/500) * 100 = 91.6%، نســـتنتج من خلال تحليل القيم الســـابقة أن أداء الشـــبكة بتدرج بحســـب وضـــوح النمط الكهربائي لكل حالة، حيث أنه كلما كان التغير في إشـــارات الجهد والتيار أكثر وضـــوحاً وانحرافاً عن الحالة الســـليمة ازدادت الدقة أي أن حســـاســـية النظام تتناســـب طرداً مع شـــدة الانحراف في البيانات الحسية.



الشكل (٢٢): مخطط دقة التشخيص حسب نوع العطل.

٣-٤-٢-٢-مخطط دقة الشبكات العصبونية الاصطناعية:

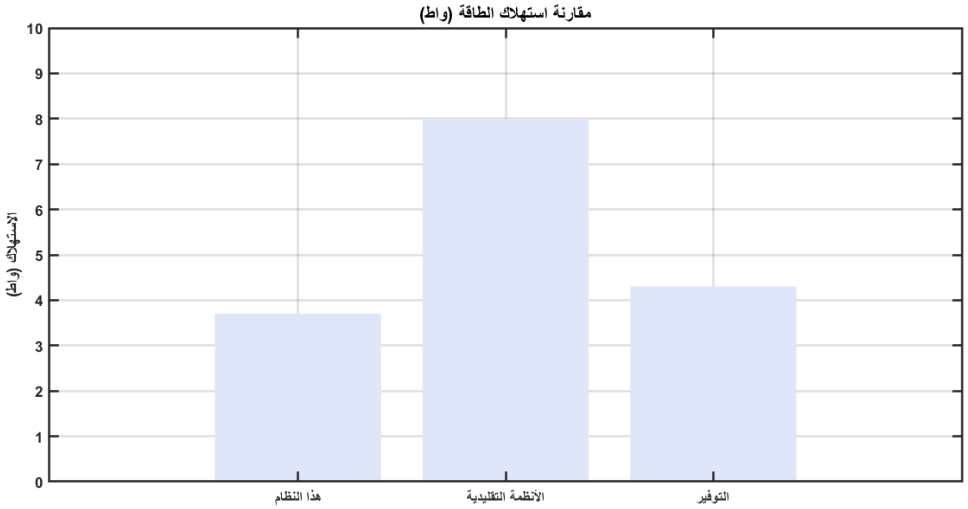
عند تحليل منحنى دقة التشخيص المبين في الشكل (٢٣) يلاحظ الدقة تتبع سلوكاً تصاعدياً ثابتاً حتى تصل إلى مستوى الإشباع في نهاية التدريب، حيث تم أخذ ٣٥٠ قيمة للتدريب والتي تقدر ب ٧٠% من البيانات، و١٥٠ قيمة للاختبار وتقدر أيضاً ب ٣٠% من البيانات مع الأخذ بعين الاعتبار أن البيانات تغطي ظروف تشغيل متنوعة خلال ٥٠ دورة تدريبية.



الشكل (٢٣): مخطط دقة الشبكات العصبونية الاصطناعية.

٣-٤-٢-٣-مخطط مقارنة استهلاك الطاقة:

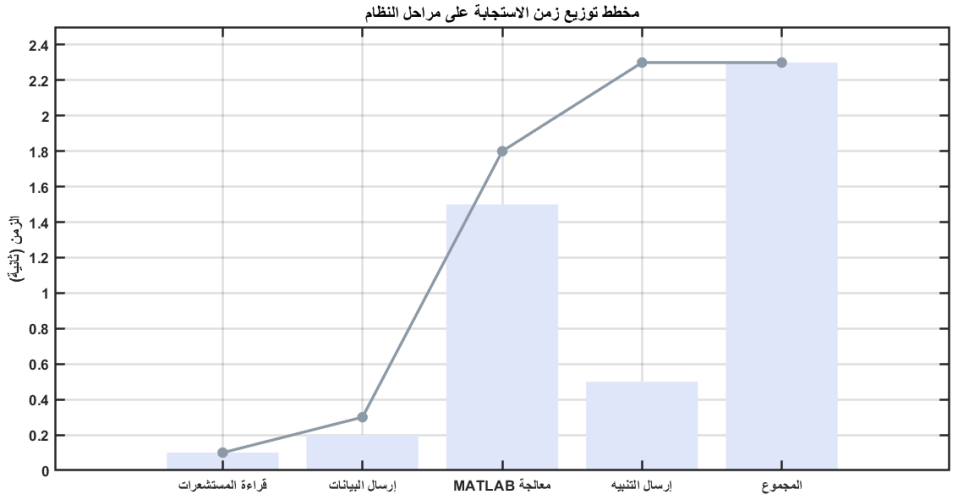
يظهر هذا المخطط في الشكل (٢٤) العلاقة الزمنية بين حالة النظام الكهروضوئي والطاقة المستهلة فعلياً ونسبة التوفير المحققة نتيجة التشخيص الذكي باستخدام الشبكات العصبونية الاصطناعية.



الشكل (٢٤): مخطط مقارنة استهلاك الطاقة.

٣-٤-٢-٤-مخطط توزيع زمن الاستجابة على مراحل النظام:

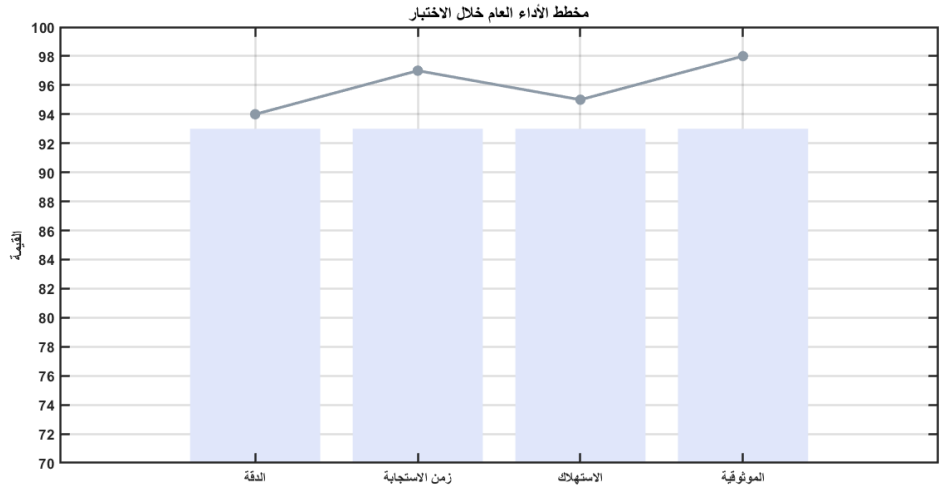
يظهر هذا المخطط كما في الشكل (٢٥) العلاقة بين مراحل التشغيل المختفة للنظام الذكي والزمن الذي تستغرقه كل مرحلة منذ لحظة حدوث الحالة في النظام إلى حين عملية التشخيص وإرسال التنبيه للمستخدم عبر تطبيق تلغرام، إذ يعبر عن مدى قدرة النظام على الكشف الآني والتفاعل الفوري مع أي تغير في أداء المنظومة الكهروضوئية.



الشكل (٢٥): مخطط توزيع زمن الاستجابة على مراحل النظام.

٣-٤-٢-٥-مخطط الأداء الفعلي خلال الاختبار:

يمثل المخطط كما في الشكل (٢٦) العلاقة الزمنية بين الأداء الفعلي للنظام الكهروضوئي (أي القيم المقاسة ميدانياً من الحساسات) وبين الأداء المتوقع أو المثالي الذي تولده الشبكات العصبونية الاصطناعية خلال فترة تشغيل محددة.



الشكل (٢٦): مخطط الأداء الفعلي خلال الاختبار.

٤-المقارنة مع الدراسات المرجعية السابقة:

بهدف تقييم كفاءة النظام المقترح وموقعه من الأبحاث الحديثة، تم إجراء مقارنة تحليلية بين نتائج هذا العمل وعدد من الدراسات المرجعية السابقة التي تناولت موضوع تشخيص الأعطال في الأنظمة الكهروضوئية باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي.

١- تم اعتماد طريقة للكشف عن الأعطال وتصنيفها في مصفوفات الخلايا الكهروضوئية باستخدام خوارزمية شجرة القرار، بالاعتماد على منحنيات الجهد والتيار المأخوذة من نظام مصغر في المختبر، بلغت دقة الكشف ٩٨% ودقة التصنيف ٩٦% مع استخدام تطبيق قائم على إنترنت الأشياء لإرسال البيانات إلى السحابة، إلا أن هذه الدراسة لم تذكر زمن الاستجابة الكامل لعملية الكشف والتشخيص، كما أن عملية المراقبة اقتصرت على تخزين البيانات دون تنبيه آني (Adel, 2021).

في المقابل، أظهر النظام المقترح في هذا البحث دقة كلية ٩١,٦% باستخدام الشبكات العصبونية الاصطناعية ANN & PNN مع تحقيق زمن استجابة مقداره ٢,٣ ثانية فقط من لحظة أخذ القراءات حتى إرسال التنبيه عبر منصة Telegram مما يعكس كفاءة زمنية واستجابة لحظية غير متوفرة في الدراسة المرجعية.

٢- تم التركيز على التنبؤ بأداء الأنظمة الكهروضوئية عبر مجموعة من خوارزميات التعلم الآلي مثل DNN, CNN, SVM حيث تراوحت دقة التشخيص بين ٨٢,١% & ٨٨,٤% مع أزمنة اختبار قصيرة نسبياً، غير أن هذه الدراسة لم تعتمد أي آلية مراقبة آنية أو تسجيل مباشر للبيانات، واقتصر العمل على المقارنة بين أداء الخوارزميات (Karthikeyan, 2023) .

في المقابل، امتاز ابحث الحالي باستخدام شبكة ANN للتنبؤ بالأداء الطبيعي وشبكة PNN للتشخيص الفعلي، إلى جانب تحقيق مراقبة زمن حقيقي من خلال تكامل ماتلاب مع منصة تلغرام، وتخزين البيانات في ملفات CSV مما يرفع من موثوقية النظام وقابليته للتحليل المستقبلي.

٣- تم تقييم نماذج تعلم آلي لتشخيص أعطال الأنظمة الكهروضوئية تحت أوضاع تشغيل متعددة مثل MPPT & LPPT، حيث حقق نموذج مصنف الشجرة المجمعة دقة ٩٢,٢% خلال زمن تدريب ١٧,٣ ثانية، بينما بلغت دقة الشبكات العصبونية التقليدية ٠,٧-.٧% ورغم الأداء المقبول إلا أن الدراسة لم تتضمن تحديداً لزمن الاستجابة ولا نظام مراقبة لحظي أو تخزين بيانات (Eduardo, 2025).

بينما في هذا العمل، تم الحصول على دقة تقارب أداء النماذج الأعلى دقة في الدراسات السابقة مع تحسين واضح في سرعة الاستجابة وتكامل المراقبة، مما يجعل النظام المقترح أكثر توافقاً مع تطبيقات التشغيل الذكي واللحظي للأنظمة الكهروضوئية.

٥- الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

١- أظهرت نتائج الدراسة العملية أن النظام المقترح القائم على التكامل بين بيئة MATLAB ووحدة التحكم Arduino، بالإضافة إلى الاتصال الذكي عبر منصة Telegram، حقق أداءً عالي الكفاءة في الكشف والتشخيص الفوري لأعطال الأنظمة الكهروضوئية، مع دقة كلية بلغت ٩١,٦% وزمن استجابة منخفض بلغ ٢,٣ ثانية، مما يؤكد فعاليته في التطبيقات الواقعية لأنظمة الطاقة الشمسية.

٢- اثبتت الشبكات العصبونية الاصطناعية كفاءتها في التمييز بين الحالات التشغيلية المختلفة (سليم – قصر – فتح – تأريض)، حيث حققت دقة مرتفعة في حالات القصر والتأريض بلغت ٩٦% و٩٠% على التوالي، في حين تبين أن حالات الفتح كانت الأصعب من حيث التصنيف بسبب تقارب أنماطها التشغيلية مع الحالة السليمة.

٣- ساهمت آلية الإشعارات الذكية عبر Telegram في تعزيز قابلية المراقبة الآنية للنظام، إذ تمكّن المشغل من تلقي إشعارات فورية عند حدوث أي عطل أو خلل في الأداء، ما يقلل زمن اكتشاف المشكلة ويزيد من استمرارية عمل النظام بكفاءة.

٤- يبرهن هذا البحث على أن اعتماد أنظمة الذكاء الاصطناعي في تشخيص الأعطال الكهروضوئية يمثل نقلة نوعية مقارنة بالطرق التقليدية، حيث يجمع النظام المقترح بين الدقة العالية، الاستجابة السريعة، والتكلفة المنخفضة، مما يجعله قاعدة يمكن تطويرها لتطبيقات أوسع في مجال الصيانة التنبؤية للطاقة المتجددة.

٥- البحث الحالي تفوق من حيث دمج الذكاء الاصطناعي مع المراقبة الزمنية المباشرة، وتخفيض زمن الاستجابة، وتوفير آلية متكاملة للتنبيه والتخزين مما يجعله نموذجاً عملياً قابلاً للتطبيق الميداني مقارنة بالدراسات السابقة التي اقتصرت على التحليل النظري أو التجارب المخبرية المحدودة.

التوصيات:

١- توسيع قاعدة البيانات التدريبية: يوصى بزيادة عدد العينات المستخدمة في تدريب الشبكات العصبونية لتشمل ظروف تشغيل مختلفة (تغير الإشعاع، درجة الحرارة، الزوايا)، مما يعزز من قدرة النظام على التعميم ودقة التشخيص في بيئات متنوعة.

٢- تطوير واجهة تشغيل رسومية تفاعلية سواء ضمن بيئة MATLAB أو عبر تطبيق ويب مخطط، بحيث تسمح بمراقبة الأداء اللحظي للنظام من خلال عرض القيم التشغيلية الأساسية، والتنبيهات التحذيرية، من أجل تسهيل عملية المراقبة والتحكم، وتحسين قابلية فهم المعلومات من قبل المشغلين مما يزيد من كفاءة تشغيل النظام وسرعة الاستجابة للأعطال.

٣- الربط مع نظام صيانة تنبؤيه: يُقترح تطوير النظام لاحقاً بحيث لا يكتفي بالكشف عن العطل، بل يتنبأ بحدوثه قبل وقوعه، عبر تحليل الاتجاهات التاريخية للبيانات وإجراء تقييم دوري لحالة المنظومة.

٤- تحسين آلية الاتصال اللاسلكي: يمكن دمج الاتصال عبر Telegram مع بروتوكولات إنترنت الأشياء مثل MQTT أوHTTP لزيادة موثوقية الاتصال واستمراريته في البيئات الصناعية.

٦-المراجع References

[1] KEBIR, S; CHEGGAGA, N; ILINCA, A; BOULOUMA. S. 2021, *An Efficient Neural Network–Based Methods for Diagnosing Faults of PV Array*. *MDPI Sustainability*, Switzerland, su134 13, 2-12.

[2] BOUBAKR, G; FARHAN, L; BALL, A. 2022, *Enhancing Virtual Real-Time Monitoring of Photovoltaic Power Systems Based on the Internet of Things*. *MDPI Sustainability*, Iraq, DOI number: 10.507, 9-18.

[3] ABUAKAR, A; JIBRIL, M; ALMEIDA, C; GEMIGNANI, M. 2023, *A Noval Hybrid Optimization Approach for Fault Detection in Photovoltaic Arrays and inverters Using AI and Statistical Learning Techniques :Afocus on Sustainable Environment Department of Electrical Engineering and Automation*. MDPI Processes, Switzerland, 11, 259, 6-17.

[4] SENTHIL, P; GNANAPOO, D; SENTHIL, K; VENKATA, S. 2024, *Real-Time Fault Detection in Solar PV Systems Using Hybrid ANN–SVM Machine Learning Algorithm*. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, India, IJISAE, 12(22s), 1-8.

[5] KUMAR, N; ATLURI, K; PALAPARTHI, S. 2018, *Internet of Things (IoT) in Photovoltaic Systems, Faculty of Electrical and Electronics Engineering*, *National Power Engineering Conference (NPEC),* Malaysia, 978-1-586, 1-4.

[6] SIVAGAMI, P; JAMUNARANI, D; ABIRAMIB, P. 2021, *Review on IOT Based remote Monitoring for Solar Photovoltaic*. *IEEE International Conference on Communication information and Computing Technology*, India, (ICCICT) 978-1, 1-5.

[7] KARTHIKEYAN, G; JAGADEESHWARAN, A. 2023, *Enhancing Solar Energy Generation: A Comprehensive Machine Learning-Based PV Prediction and Fault Analysis System for Real-Time Tracking and Forecasting*. *Electric Power Components and Systems*, Francis, DOI: 10.108, 9-17.

[8] HAQUE, A; KHAN, M; KHAN, I; JAFFERY, Z. 2019, *Fault diagnosis of Photovoltaic Modules, Energy Science & Engineering published,* Industry, DOI: 10.1002/ese3.255, 3-19.

[9] AlMHDAWI, A; RAWESHIDY, H; MEMBER, S. 2019, *A Smart Optimization of Fault Diagnosis in Electrical Grid Using Distributed Software-Defined IoT System*. MDPI Processes, London, ELIN: A011, 7-21.

[10] ADEL, M; OMAR, H; CATALINA, C. 2021، *A Machine Learning and Internet of Things-Based Online Fault Diagnosis Method for Photovoltaic Arrays*. *Sustainability MDPI,* Switzerland, u132.3203, 1-14.

[11] EDUARDO, C; PEDRO, R; IGNACIO, M. 2025, *Performance Optimization of Machine-Learning Algorithms for Fault Detection and Diagnosis in PV Systems*. *MDPI*, Switzerland, 14, 1709, 1-18.