Journal of Technology Research (JTR)
Volume 4, Issue 2, (2026), pp 135-144, ISSN 3005-639X

Simulation of a Dual-axis Solar Tracking System Based on Artificial Neural Networks: A Case Study of Misrata City

Abdulhamid A. Elsharif[1], Sattar J. Alisawi*[1], Mohamed Y. Qusaibat[1], Saed H. Salem[1]

[1]Department of Electromechanical Engineering, Faculty of Industrial Technology, Misurata, Libya.
*Corresponding author email: sattarjaber@cit.edu.com

Received: 26-07-2026 | Accepted: 08-09-2026 | Available online: 10-09-2026 | DOI:10.26629/jtr.2026.11

ABSTRACT

This research addresses the problem of low efficiency of fixed solar panels and the shortcomings of traditional tracking systems based on photonic sensors, which are highly susceptible to environmental factors. In this research, a control unit was developed using a multi-layer perception model (MLPRegressor) to receive time variables and predict optimal orientation angles. To ensure the highest levels of reliability, astronomical laws were combined with real-world climate data recorded via NASA POWER satellites. Furthermore, a transfer learning strategy was applied to train Artificial Neural Network (ANN). The results showed a 96.97% accuracy in matching real-world data, with orientation deviations remaining within safe geometric tolerance limits. Cosine loss did not exceed 0.4%, and the simulated radiant gain demonstrated a tremendous summer system advantage of 68.13%, achieving an average total annual increase of 25.60% in incident radiation compared to the stationary system.

Keywords: Solar cells, Solar tracking systems, Neural networks, Artificial Intelligence.

محاكاة نظام تتبع شمسي ثنائي المحور يعتمد على الشبكات العصبية الاصطناعية "حالة دراسية مدينة مصراتة"

عبدالحميد عبدالسلام الشريف[1]، ستار جابر العيساوي[1]، محمد يوسف قصيبات[1]، سعد حافظ سالم[1]

[1] قسم الهندسة الكهروميكانيكية، كلية التقنية الصناعية مصراتة، مصراتة، ليبيا

ملخـــــص البحـــــث

يعالج هذا البحث مشكلة انخفاض كفاءة الألواح الشمسية الثابتة، وقصور أنظمة التتبع التقليدية المعتمدة على المستشعرات الضوئية التي تتأثر بشدة بالعوامل البيئية، حيث تم في هذا البحث تطوير وحدة التحكم باستخدام نموذج الإدراك متعدد الطبقات لتستقبل المتغيرات الزمنية (رقم اليوم والساعة) وتتنبأ بزوايا التوجيه المثلى (الارتفاع والسمت)، ولضمان أعلى درجات الموثوقية، تم دمج القوانين الفلكية مع بيانات مناخية واقعية مسجلة عبر الأقمار الصناعية لوكالة ناسا، كما تم تطبيق استراتيجية نقل التعلم لتدريب شبكة عصبية اصطناعية (ANN)على التكيف مع التشتت الجوي الحقيقي والتظليل الفجائي. أظهرت النتائج تطابق مع البيانات الواقعية بدقة بلغت 96.97%، مع بقاء انحرافات التوجيه ضمن نطاق التسامح الهندسي الآمن، حيث لم يتجاوز الفقد الإشعاعي نسبة 0.4%، كما أثبتت محاكاة الكسب الإشعاعي تفوقاً هائلاً للنظام في فصل الصيف بزيادة بلغت 68.13%، محققاً زيادة سنوية إجمالية بلغت 25.60% في الإشعاع الساقط مقارنة بالنظام الثابت.

الكلمات الدالة: الخلايا الشمسية، أنظمة التتبع الشمسي، الشبكات العصبية، الذكاء الاصطناعي.

"Articles published in *J Technol Res* are licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License."

1. المقدمـة

شهد العالم تحولاً استراتيجياً نحو الطاقات المتجددة، وفي مقدمتها الطاقة الشمسية، كبديل مستدام ونظيف لمواجهة تحديات أمن الطاقة ونضوب الوقود الأحفوري، ورغم التطور التقني الهائل الذي خفض من تكاليف الخلايا الكهروضوئية وجعلها خياراً تنافسياً، إلا أن التحدي الهندسي الأبرز يبقى متمثلاً في كيفية تعظيم كفاءة هذه الألواح لاستغلال كل شعاع شمسي متاح بأفضل صورة ممكنة. في هذا السياق، لم يعد الاعتماد على الأنظمة الشمسية الثابتة كافياً لتحقيق الإنتاجية القصوى، مما جعل التحول نحو أنظمة التتبع الشمسي ضرورة ملحة، ولتجاوز قصور طرق التحكم التقليدية في التعامل مع التقلبات الجوية المتسارعة، يبرز الذكاء الاصطناعي كأداة متطورة لتوجيه الألواح ديناميكياً وبدقة عالية، وهو ما يشكل الدافع الرئيسي والجوهر الهندسي لهذا البحث [1]. معظم الأنظمة الكهروضوئية إما ثابتة أو تستخدم أنظمة تتبع تقليدية، الأنظمة الثابتة تهدر كمية كبيرة من الطاقة لأنها لا تواجه الشمس بشكل مباشر طوال اليوم، أما أنظمة التتبع التقليدية، فرغم أنها أفضل، إلا أنها تعتمد على خوارزميات فلكية مبرمجة مسبقا لتتبع المسار النظري للشمس، متجاهلة الظروف الجوية الحقيقية والمتغيرة، مما يخلق فجوة بين كمية الطاقة الممكن توليدها والطاقة المنتجة.

يهدف البحث الى بناء وتدريب نموذج تحكم يعتمد على الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) لاستنتاج زوايا التوجيه المثلى (الارتفاع والسمت) بناءً على متغيرات زمنية بسيطة (اليوم والساعة) دون الحاجة لحسابات رياضية داخل وحدة التحكم، وحساب المحصلة السنوية الإجمالية للطاقة المكتسبة في مدينة مصراتة، وتقديم دراسة لاستبدال أنظمة التحكم التقليدية بالذكاء الاصطناعي وكذلك يهدف الى دمج القوانين الفلكية البحتة مع بيانات مناخية واقعية مسجلة عبر الأقمار الصناعية لناسا لمدينة مصراتة، لضمان قدرة النظام على التكيف مع التشويش الفعلي للغلاف الجوي والتظليل الناتج عن الغيوم.

2. نموذج تتبع شمسي معتمد على (ANN):

عرضت خديجة دهلي وآخرون نظام تتبع شمسي مستوحى من سلوك السرب مع أداء تكيفي في ظروف بيئية متنوعة [2]، في هذه الدراسة انتهج الباحثون مساراً مغايراً للطرق التقليدية عبر محاكاة الأنظمة البيولوجية، وتحديداً "سلوك أسراب الطيور"، اعتمدت الدراسة على خوارزمية تحسين السرب لتمكين الألواح الشمسية من العمل كمنظومة لا مركزية، أظهرت النتائج التجريبية زيادة في كفاءة جمع الطاقة بنسبة 17.4%، وتقليلاً في استهلاك طاقة التشغيل بنسبة 11%، مع دقة تتبع عالية بخطأ لا يتجاوز 1.09 درجة.

عرض اذارف ياقد وآخرون تصميم نظام تتبع شمسي قائم على الذكاء الاصطناعي [3]، عالج هذا البحث مشكلة انخفاض كفاءة الألواح الثابتة من خلال تصميم نموذج أولي لنظام تتبع يعتمد على الذكاء الاصطناعي، تم تنفيذ العمل عملياً باستخدام لوحة تحكم "أردوينو" كعقل للنظام، ، حيث يصدر الأردوينو أوامر دقيقة لمحركات السيرفو لتحريك اللوح الشمسي، توصلت الدراسة إلى أن نظام التتبع الذكي تمكن من تحقيق زيادة في إنتاج الطاقة تتجاوز 45% مقارنة بالألواح المثبتة.

عرض كريشنة كومبا وآخرون أنظمة تتبع الطاقة الشمسية: التطورات، التحديات، والتوجهات المستقبلية: مراجعة شاملة [4]، قام الباحثون بإجراء مراجعة علمية واسعة لمختلف الدراسات المتعلقة بأنظمة التتبع، وتصنيف أنواع الأنظمة، وكانت أهم النتائج التي خلصت إليها هذه المراجعة هي التأكيد القاطع على أن أنظمة التتبع الشمسي (STS) تحقق زيادة كبيرة في إنتاج الطاقة، ووجه الأنظار نحو الذكاء الاصطناعي.

عرض زولكمين وآخرون تحليل وحدات تحكم نظام التتبع الشمسي ثنائي المحور بناءً على نظام الاستنتاج العصبي الضبابي المتكيف (ANFIS) [5]، هدفت الدراسة إلى تجاوز قصور النماذج الرياضية الخطية من خلال استخدام نظام (ANFIS)، استخدم الباحثون بيئة MATLAB لمحاكاة النظام، اعتمد النموذج على 15 دالة عضوية من نوع غاوس (Gaussian) لتحقيق أفضل دقة، أثبتت النتائج أن زيادة عدد دوال العضوية يرفع دقة التنبؤ بشكل ملحوظ ويقلل نسبة الخطأ إلى أدنى مستوياتها مقارنة بالأنظمة الكلاسيكية.

عرض فرهاد صالح وآخرون نظام ذكي لمراقبة الألواح الشمسية وكشف التظليل باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية [6]، صمم الباحثون نظاماً يدمج بين الشبكات العصبية الاصطناعية وتقنية إنترنت الأشياء (IoT) ليس فقط

للتتبع، بل لمراقبة الحالة الصحية للألواح وكشف التظليل الجزئي، أثبتت النتائج نجاح النظام بفعالية عالية في تحديد اللوح المتضرر بدقة، مما يدل على دقة النموذج، ولكن الدراسة ركزت على "المراقبة" أكثر من تركيزها على خوارزمية "التحكم.

عرض هويلن شنك وآخرون تصميم وتنفيذ نظام تتبع شمسي ثنائي المحور [7]، عالج هذا البحث مشكلة انخفاض الكفاءة من خلال بناء نموذج أولي لنظام تتبع شمسي ثنائي المحور، تم إجراء التجربة العملية في مدينة شنغهاي بالصين، وذلك من خلال استخدام "طريقة المقاومة الكهروضوئية"، أظهرت النتائج تفوقاً واضحاً للنظام المتحرك، حيث تمكن من توليد طاقة أعلى بنسبة 24.6% مقارنة باللوح الثابت.

عرض أحمد بريح وآخرون نظام تتبع شمسي قائم على الذكاء الاصطناعي ومدعوم سحابياً [8]، تتمحور فكرة البحث حول نقل العبء الحسابي من المتحكم المحلي إلى السحابة (Cloud)، في هذا النظام، يتصل المتحكم الموجود في الموقع الشمسي بالإنترنت لتلقي أوامر التوجيه الجاهزة من الخادم السحابي، مما يلغي الحاجة لمستشعرات محلية، ويجعل النظام قابلاً للتوسع (Scalable).

عرض علي نجم وآخرون تصميم ودراسة أداء نظام تتبع شمسي ثنائي المحور لمناخ شرق ليبيا [9]، ركزت هذه الدراسة على التحديات المناخية الخاصة بمدينة المرج في ليبيا، قام الفريق بتصميم وبناء نموذج أولي لنظام تتبع ثنائي المحور يستخدم أربع مقاومات ضوئية (LDRs) لتحديد اتجاه الشمس، وأظهرت النتائج الميدانية تفوق النظام المتحرك بزيادة في إنتاج الطاقة وصلت إلى 61% في الأيام الصافية.

عرض إسماعيل محمد كفاءة أكبر لنظام الطاقة الشمسية في ليبيا باستخدام الذكاء الاصطناعي [10]، استهدف الباحث معالجة مشكلتي تراكم الغبار وارتفاع درجات الحرارة اللتين تميزان البيئة الليبية، أظهرت نتائج المحاكاة قدرة النظام على تحسين الكفاءة التشغيلية والتعامل بمرونة مع المتغيرات البيئية.

عرض نادية وآخرون تطورات في أنظمة تتبع الطاقة الشمسية الكهروضوئية مراجعة شاملة [11]، دراسة مسحية صنفت أنظمة التتبع إلى فئات متعددة واستعرضت الفروقات الجوهرية بين استراتيجيات التحكم المختلفة، خلصت المراجعة إلى نتيجة مفادها أن الأنظمة الهجينة (التي تدمج الحسابات الفلكية مع المستشعرات الذكية) هي المستقبل لضمان الموثوقية العالية.

من خلال التحليل المتعمق والمفصل للدراسات السابقة، تتضح الفجوة البحثية التي يسعى هذا المشروع لملئها، فبينما قدمت الدراسات العالمية الحديثة مثل [6] [5] [2] خوارزميات متقدمة للغاية مثل (ANFIS و PSO)،إلا أنها تتطلب غالباً قدرات حسابية عالية أو بنية اتصال معقدة بين الألواح لا تتناسب مع التطبيقات البسيطة، وفي المقابل، فإن الحلول السحابية مثل [8] ترهن عمل النظام بوجود إنترنت مستقر، وهو ما لا يناسب البيئات النائية في ليبيا، أما الدراسات المحلية مثل [10] [9]، فقد ركزت إما على الجانب الميكانيكي البحت باستخدام مستشعرات تقليدية، أو على المحاكاة النظرية، مع نقص واضح في تطبيق الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) كحل وسط مثالي يجمع بين قدرة التعلم والعمل بشكل مستقل.

3. نموذج تتبع شمسي معتمد على (ANN):

المنهجية الهندسية للتتبع المتبعة لتطوير وحدة تحكم تعتمد على الشبكات العصبية الاصطناعية، دون الحاجة إلى استخدام مستشعرات أو إدراج معادلات رياضية داخل وحدة التحكم، حيث يتم وصف بيئة العمل البرمجية، وآلية دمج البيانات الفلكية المثالية مع بيانات الأقمار الصناعية الواقعية لوكالة (NASA) لمدينة مصراتة، وصولاً إلى هيكلية الشبكة العصبية واستراتيجية تدريبها، لحساب الكسب الإشعاعي.

1.3 بيئة المحاكاة والأدوات البرمجية:

لتنفيذ هذا النموذج تم الاعتماد على لغة البرمجة (Python) نظراً لتفوقها في مجالات تعلم الآلة ومعالجة البيانات الضخمة، تمت كتابة الخوارزميات ضمن بيئة التطوير السحابية المدمجة، بالاعتماد على المكتبات الهندسية التالية:

- **مكتبة (pvlib):** وهي مكتبة برمجية مفتوحة المصدر ومعتمدة عالمياً في أبحاث هندسة الطاقة الشمسية، تم استخدامها لحساب زوايا مسار الشمس بدقة فلكية عالية، وتوليد نماذج السماء الصافية وحساب زاوية السقوط.

- **مكتبة (sklearn):** وتُعد الأداة الأساسية التي تم بناء الشبكة العصبية (MLPRegressor) بواسطتها، بالإضافة إلى توفير خوارزميات معايرة البيانات وتقييم الخطأ الرياضي.

- **واجهة برمجة تطبيقات (NASA POWER API):** تم استخدامها كجسر لجلب بيانات الغلاف الجوي والإشعاع الشمسي المباشر المسجلة فعلياً عبر الأقمار الصناعية.

- **مكتبات (Pandas, NumPy, Matplotlib):** لإدارة هياكل البيانات الزمنية، إجراء العمليات الجبرية على المصفوفات، وتوليد المخططات البيانية لتحليل الأداء.

2.3 جمع البيانات ومعالجتها:

تعتبر جودة البيانات عامل مهم في نجاح أي نموذج يعتمد على الذكاء الاصطناعي، ولضمان تغطية كافة الاحتمالات الزمنية والمناخية، تم توليد وتجميع مجموعة بيانات لعام (2024)، وتمت معالجة البيانات عبر ثلاث مراحل أساسية هي:

أولاً: دمج البيانات الفلكية والواقعية: تم تحديد النطاق الجغرافي للمحاكاة بناءً على إحداثيات مدينة مصراتة، ليبيا (خط عرض 32.37^o شمالاً، وخط طول 15.09^o شرقاً).

- **الجانب الرياضي:** تم استخدام خوارزميات **pvlib** لحساب الموقع الزاوي المثالي للشمس (الارتفاع والسمت) بخطوة زمنية مقدارها ساعة واحدة.

- **الجانب الواقعي:** تم جلب بيانات الإشعاع الشمسي المباشر وزاوية السمت الرأسي من سجلات وكالة ناسا لنفس الإحداثيات والتوقيت، تم حساب زاوية الارتفاع الواقعية بطرح زاوية السمت الرأس الشمسي من 90 درجة.

$$(\beta = 90^o - \theta_z) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

حيث: β :زاوية الارتفاع θ_z : زاوية السمت الرأس الشمسي.

ثانياً: فلترة البيانات: نظراً لأن أنظمة التتبع الشمسي تدخل في وضع السكون أو تعود لوضعية الشروق أثناء الليل، فإن إدخال البيانات الليلية للشبكة العصبية يعتبر هدراً للموارد الحسابية وقد يسبب تشويشاً للنموذج، بناءً على ذلك، تم تطبيق مرشح برمجي لاستبعاد أي عينة زمنية تكون فيها زاوية ارتفاع الشمس أقل من 5^o فوق الأفق، نتج عن عملية الفلترة الاحتفاظ بحوالي 4089 عينة بيانات نهارية فعّالة صالحة للتدريب والاختبار.

ثالثاً: معايرة وتطبيع البيانات: تتعامل الشبكات العصبية بكفاءة أعلى مع الأرقام الصغيرة المتقاربة، ونظراً لوجود تفاوت كبير في المقاييس (مثلاً: زاوية السمت تصل إلى 290^o عند الغروب صيفا بينما الوقت لا يتجاوز 24 ساعة)، تم استخدام تقنية لتحويل كافة المدخلات والمخرجات إلى نطاق خطي محصور بين الصفر والواحد بواسطة المعادلة التالية:

$$X_{scaled} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2)$$

حيث:

X_{scaled}: القيمة المعايرة (المطبعة) للمتغير.

X : القيمة الأصلية للمتغير قبل المعايرة (زاوية أو الوقت).

X_{min}: القيمة الصغرى للمتغير في مجموعة البيانات الكلية.

X_{max}: القيمة الكبرى للمتغير في مجموعة البيانات الكلية.

3.3 البنية الهيكلية للشبكة العصبية:

تم تصميم وحدة التحكم المركزية باستخدام نموذج الإدراك متعدد الطبقات، رُوعي في التصميم تجنب التعقيد المفرط الذي قد يبطئ زمن الاستجابة، مع الحفاظ على عمق كافٍ لمعالجة اللاخطية العالية لمسار الشمس. وبنية الشبكة هي:

أ- **طبقة الإدخال (Input Layer)** : تتكون من عقدتين فقط:

- **العقدة الأولى:** الترتيب التراكمي لليوم في السنة (Day of Year)، لتمثيل التغير الموسمي لزاوية الانحراف الشمسي.

- **العقدة الثانية:** الوقت المحلي بصيغة كسرية (Decimal Hour) لتمثيل زاوية الساعة.

تم اختيار هذين المدخلين تحديداً يهدف إلى الاستغناء عن المستشعرات الخارجية التي تتأثر بالغبار والظلال، والاكتفاء بساعة توقيت حقيقي مدمجة في وحدة التحكم.

ب–الطبقات المخفية (Hidden Layers): تم بناء طبقتين مخفيتين متتاليتين، تحتوي كل منهما على 100 عصبون (100*100).

ت–دالة التنشيط (Activation Function) : تم تطبيق دالة الوحدة الخطية المصححة (ReLU) داخل الطبقات المخفية لتجاوز مشكلة تلاشي التدرج وتسريع العمليات الحسابية.

ث–طبقة الإخراج (Output Layer): تتألف من عقدتين تُصدران القيم المستهدفة للزوايا (الارتفاع والسمت).

4.3 استراتيجية التدريب ونقل التعلم:

للوصول إلى أعلى دقة ممكنة، لم يتم تدريب الشبكة بطريقة تقليدية، بل تم استخدام استراتيجية متقدمة تُعرف بـ "نقل التعلم" (Transfer Learning) عبر تفعيل خاصية البدء الدافئ (warm_start=True) في المحسن (Adam Optimizer).

تم تنفيذ التدريب عبر مرحلتين:

- **المرحلة الأولى (التأسيس الرياضي):** تم إدخال المعادلات الفلكية المثالية للشبكة العصبية وتدريبها لضبط الأوزان الابتدائية، في هذه المرحلة، اكتسبت الشبكة الفهم الأساسي للمسار الهندسي للشمس حسب قوانين الفيزياء الفلكية.
- **المرحلة الثانية (التكيف الواقعي):** مع الاحتفاظ بالمعرفة المكتسبة من المرحلة الأولى، تم استئناف تدريب الشبكة باستخدام بيانات وكالة ناسا الواقعية لمدينة مصراتة، في هذه المرحلة، قامت الخوارزمية بعمل تعديلات دقيقة لأوزانها لكي تتكيف مع التشويش الحقيقي الناتج عن الانكسارات الضوئية في الغلاف الجوي والتشتت الناجم عن الغيوم، وقد أُجريت العملية على مدار 1000 دورة تدريبية ((Epochs لتقليل متوسط الجذر التربيعي الخطأ (RMSE) إلى أدنى قيمة.

5.3 النمذجة الرياضية لتقييم الكسب الإشعاعي:

لتقييم الجدوى الاقتصادية والهندسية من تطوير خوارزمية التتبع، تم تنفيذ محاكاة لمقارنة الإشعاع الشمسي المستلم بين نظامين افتراضيين:

أ– النظام المرجعي (اللوح الثابت): تم افتراض لوح شمسي موجه تماماً نحو الجنوب الجغرافي (السمت= 180^o) ويميل بزاوية تتطابق مع خط عرض مصراتة (الميل= 32.37^o)، هذه الإعدادات تعتبر فلكياً هي الزوايا المثالية السنوية للأنظمة الثابتة في هذه المنطقة.

ب– النظام التتبع بالذكاء الاصطناعي: لوح متحرك تتغير زوايا ميله وتوجيهه زمنياً بناءً على المخرجات اللحظية للشبكة العصبية المدربة.

تم حساب القدرة الإشعاعية المكتسبة اللحظية وفقاً للمعادلة التالية:

$$P_{received} = \mathrm{DNI} \times \max\big(0, \cos(\mathrm{AOI})\big) \dots\dots (3)$$

حيث أن:

$P_{received}$: كثافة القدرة الإشعاعية الفعالة الساقطة على سطح اللوح الشمسي، وتقاس بوحدة (w/m^2).

DNI : الإشعاع الشمسي المباشر العمودي (Direct Normal Irradiance)المستمد من بيانات الأقمار الصناعية(NASA) ، ويقاس بوحدة (w/m^2).

AOI : زاوية السقوط (Angle of Incidence) ، وهي الزاوية المحصورة بين الشعاع الشمسي الساقط والخط العمودي الوهمي على سطح اللوح الشمسي.

$max(0, \dots)$: دالة رياضية تُستخدم لضمان عدم تسجيل قيم سالبة للقدرة عندما تغيب الشمس خلف اللوح أي عندما تكون زاوية السقوط أكبر من 90 درجة مما يجعل قيمة جيب التمام سالبة.

4. النتائج والمناقشة:

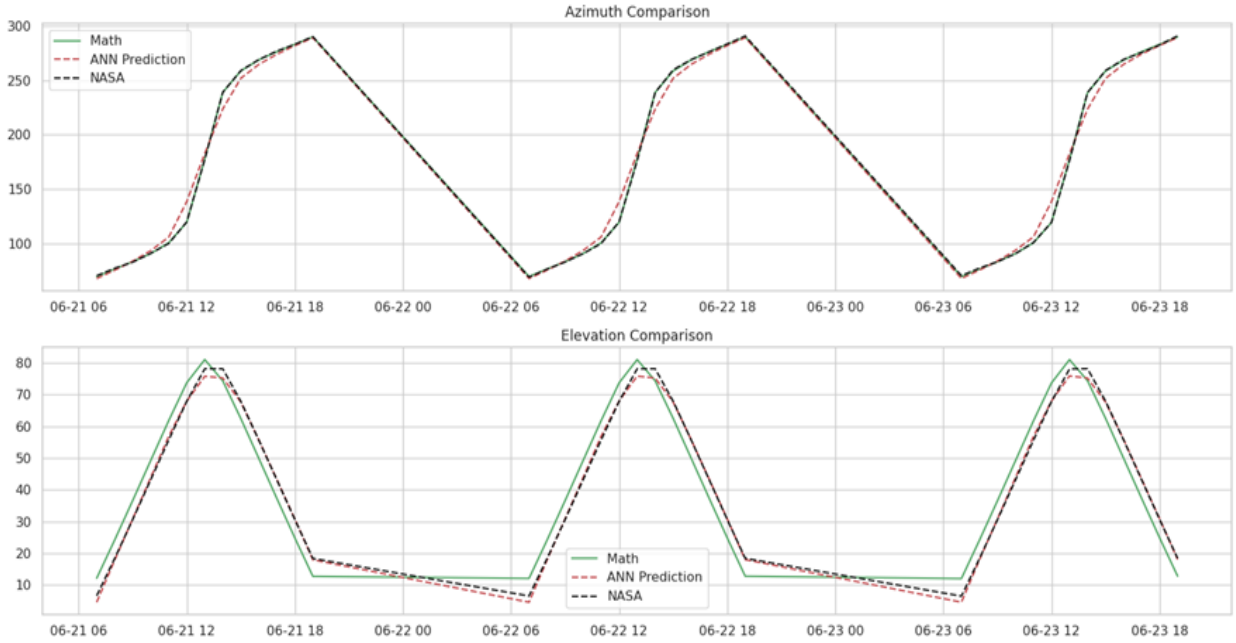
تم حساب نتائج المحاكاة لنموذج التتبع الشمسي المعتمد على الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) لمدينة مصراتة، وتم

تقييم أداء النظام من خلال مقارنة مخرجات الذكاء الاصطناعي مع كل من: النماذج الفلكية الرياضية البحتة والبيانات المناخية الواقعية المسجلة عبر الأقمار الصناعية لوكالة ناسا ينقسم التحليل إلى تقييم دقة التتبع الزاوي وتحليل الكسب الإشعاعي الموسمي والسنوي.

1.4 تقييم أداء الشبكة العصبية لدقة التتبع الزاوي:

يُعد التوجيه الدقيق لمحاور الألواح الشمسية المعيار الأول لنجاح خوارزمية التحكم، يوضح الشكل (1) تتبع النظام لمسار الشمس خلال فترة الانقلاب الصيفي (21 إلى 23 يونيو)، من خلال التحليل الهندسي والإحصائي للمنحنيات يظهر الخط الأحمر المتقطع (تنبؤات ANN) انطباقاً عالياً مع كل من المسار الرياضي المثالي (الخط الأخضر) والمسار الواقعي لناسا (الخط الأسود المتقطع)، هذا التوافق يثبت أن الشبكة لم تقم بحفظ البيانات (Overfitting) بل فهمت السلوك الحركي للشمس.

حقق النموذج معامل التحديد (R^2 Score) دقة بلغت 96.55% عند مقارنته بالمسار الرياضي، وارتفعت الدقة لتصل إلى 96.97% عند مقارنته ببيانات ناسا الواقعية، هذا الارتفاع يثبت نجاح استراتيجية "نقل التعلم" (Transfer Learning) في جعل الشبكة تتكيف مع التشويش الحقيقي للغلاف الجوي. سجل النظام نسبة خطأ (NRMSE) في زاوية السمت بلغت 0.23% فقط مقارنة ببيانات ناسا، وهو ما يعني توجيهاً أفقياً شبه مثالي، في حين بلغت نسبة الخطأ في زاوية الارتفاع حوالي 6.23% من إجمالي النطاق الحركي للشمس، وبترجمة هذه النسبة المئوية إلى درجات فعلية (مع الأخذ في الاعتبار أن نطاق ارتفاع الشمس يقارب 75^o نجد أن متوسط الانحراف يقارب 4.6^o). من الناحية الفيزيائية، هذا الانحراف يقع بامتياز ضمن نطاق التسامح التشغيلي الآمن لأن الفقد الإشعاعي يعتمد على جيب التمام لزاوية السقوط رياضياً، انحراف بمقدار 4.6 درجات يضمن استمرار استقبال اللوح لأكثر من 99.6% من الإشعاع المتاح.

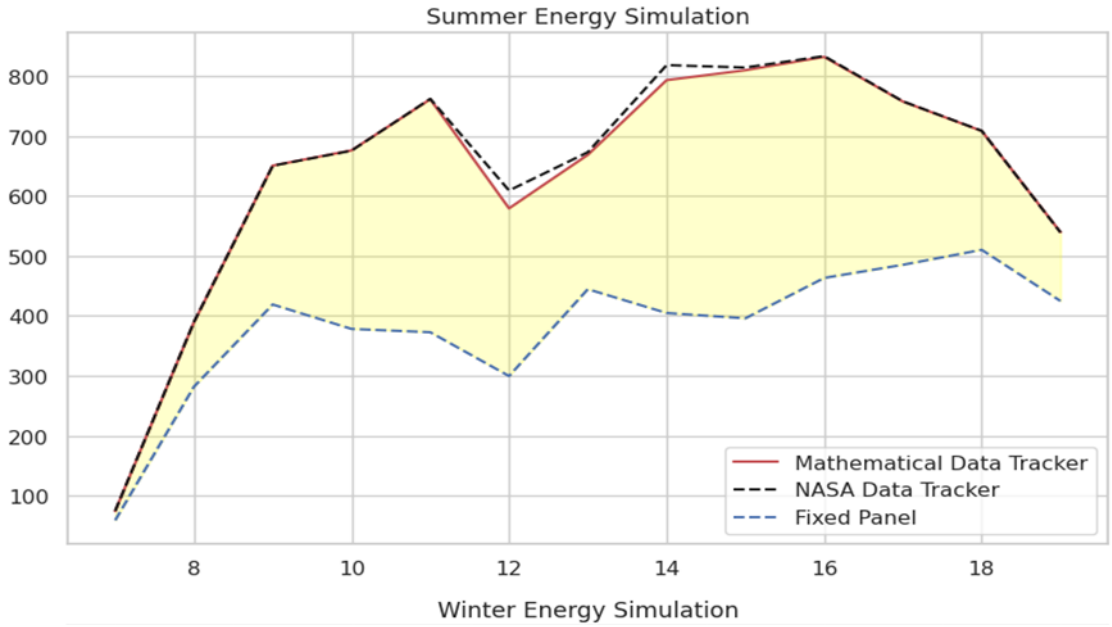


شكل رقم (1): مقارنة بين زوايا مسار الشمس وتنبؤات الشبكة العصبية.

2.4 تحليل الكسب الإشعاعي الموسمي:

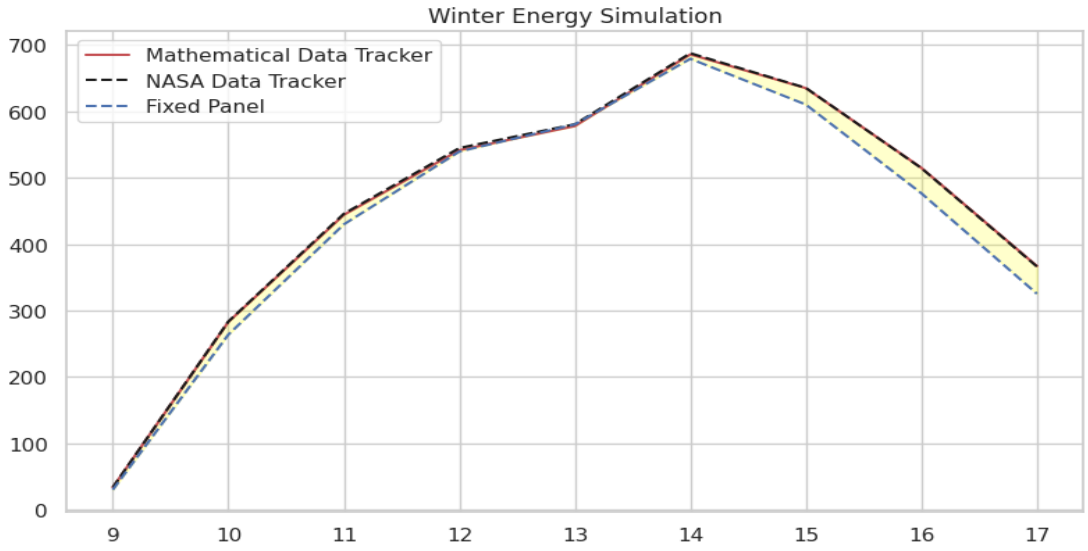
لتقييم الجدوى الفنية للنظام المقترح، تمت محاكاة أدائه الإشعاعي ومقارنته بالنظام الثابت عبر فصول السنة الأربعة في مدينة مصراتة باستخدام بيانات **(NASA)** الواقعية، وفيما يلي تحليل مفصل لمقدار الكسب الإشعاعي المحقق في كل فصل.

أولاً: الأداء في فصل الصيف: أظهرت المحاكاة في فترة الانقلاب الصيفي(شهر يونيو) المبينة بالشكل رقم (2) قفزة هائلة في الأداء، حيث بلغ الكسب الإشعاعي 66.79% ، في الانقلاب الصيفي تصل زاوية انحراف الشمس $\boldsymbol{d}$ إلى أقصى قيمة لها (23.45+ درجة) لمدينة مصراتة وعند زاوية خط عرض قيمتها $\boldsymbol{\alpha = 32.37^o}$ وزاوية الوقت الشمسي $\boldsymbol{h = 0}$ نجد أن زاوية الارتفاع $\boldsymbol{\beta = 81.08^o}$ ، الشمس تكون شبه عمودية تماماً وبما أن اللوح الثابت يميل بزاوية 32.37 درجة فإن أشعة الشمس تضرب اللوح بزاوية سقوط حادة تفقده الكثير من الإشعاع المباشر في المقابل، تقوم خوارزمية الذكاء الاصطناعي بتعديل زاوية ميل المتتبع ليصبح شبه أفقي مما يرفع كثافة القدرة الإشعاعية المستلمة إلى حدها الأقصى.



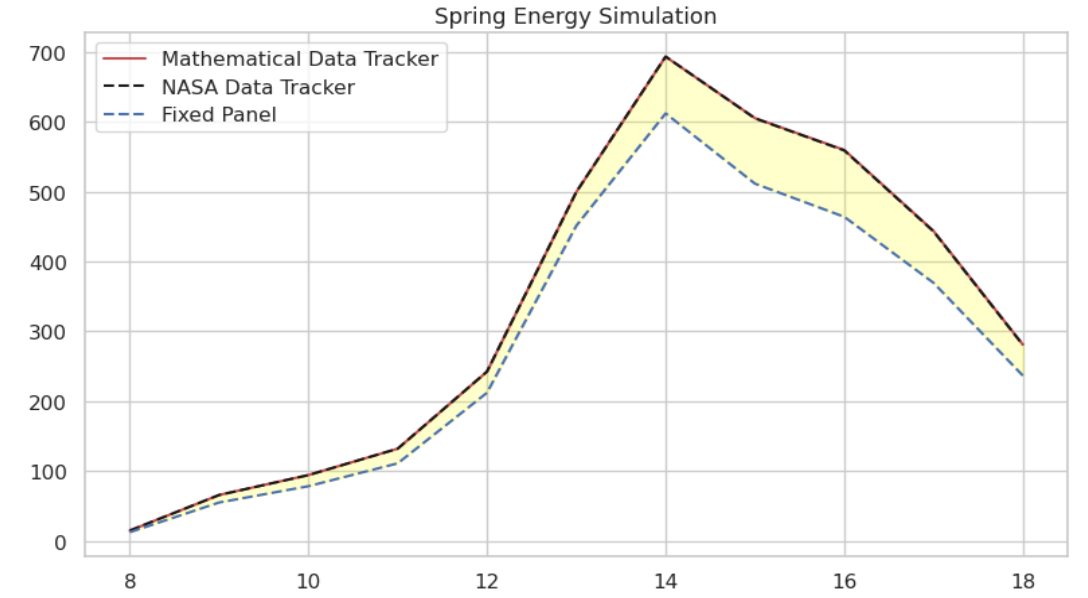
شكل رقم (2): محاكاة القدرة الإشعاعية الساقطة في الصيف.

ثانياً: الأداء في فصل الشتاء: أظهرت سجلت المحاكاة في فترة الانقلاب الشتوي (شهر ديسمبر) المبينة بالشكل رقم (3) كسباً طفيفاً بلغ **3.76%** هذا التراجع ليس قصوراً في الخوارزمية، بل هو تأكيد رياضي قاطع على دقة المحاكاة في الانقلاب الشتوي، تهبط زاوية انحراف الشمس إلى ذروتها السالبة (23.45− درجة) وبتطبيق نفس المعادلة نجد ان زاوية الارتفاع الشمسي $\boldsymbol{\beta = 34.18^o}$ ، الشمس في الشتاء منخفضة جداً اللوح الثابت مفترض في هذه المحاكاة ليكون موجهاً للجنوب وبزاوية ميل 32.37 درجة، عندما تكون زاوية ميل اللوح شبه متطابقة مع زاوية ارتفاع الشمس المنخفضة، فإن اللوح الثابت يكون متعامداً تقريباً مع أشعة الشمس الشتوية لذلك، فإن النظام الثابت يحقق كفاءة منخفضة نسبية في الشتاء، وينحصر التفوق البسيط لخوارزمية **(ANN)** في الساعات الأولى والأخيرة من النهار القصير أصلاً، مما يفسر تقارب المنحنيين وانحصار مقدار الكسب في 3.76% فقط.



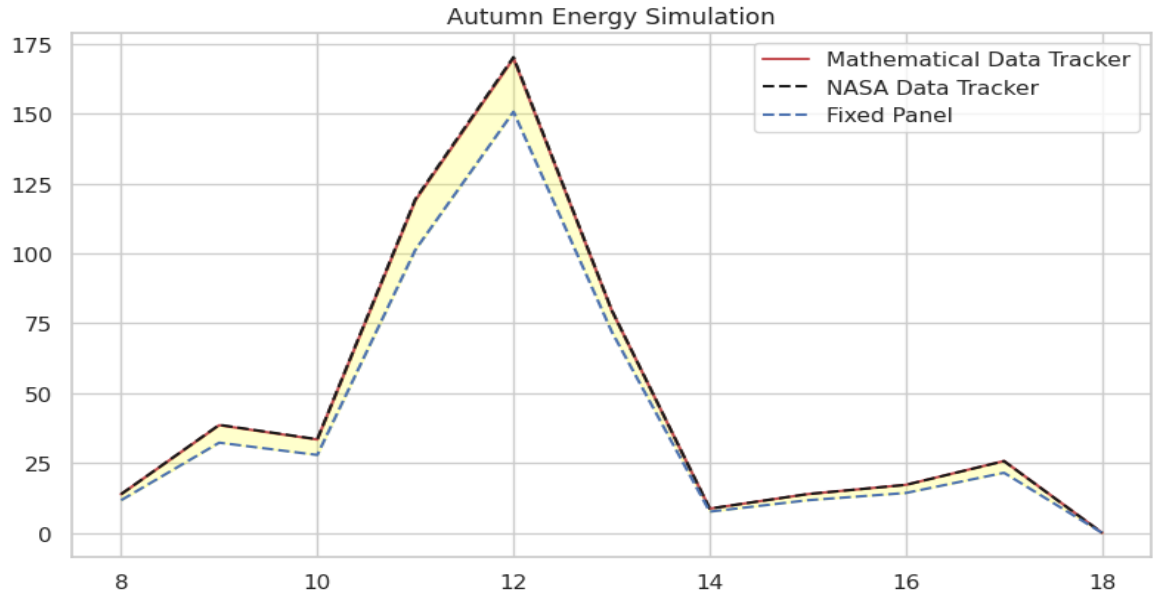
شكل رقم (3): محاكاة القدرة الإشعاعية الساقطة في الشتاء.

ثالثاً: الأداء في فصل الربيع: في الاعتدال الربيعي لمدينة مصراتة أظهرت سجلت المحاكاة المبينة بالشكل رقم (4) حيث بلغت نسبة الزيادة في الكسب الاشعاعي الى16.62%، يصل أقصى ارتفاع للشمس وقت الظهيرة إلى حوالي 57.6 درجة وبما أن اللوح الثابت يميل بزاوية 32.37 درجة فإن مجموع الزاويتين يقارب ال90 درجة هذا يعني أن أشعة الشمس تسقط بشكل شبه عمودي على اللوح الثابت في منتصف النهار، ولذلك نلاحظ في الرسم البياني أن الخط الأزرق (الثابت) يقترب جداً من الخط الأحمر (المتتبع) وقت الظهيرة، ولا يضيف التتبع كسباً كبيراً في هذه اللحظات، في الربيع، تشرق الشمس من الشرق تماماً وتغرب في الغرب تماماً، اللوح الثابت (الموجه للجنوب دائماً) يعاني من فاقد جيبي كبير **(Cosine Loss)** في هذه الفترات، هنا تبرز قوة الشبكة العصبية **(ANN)** التي توجه المحركات نحو الشرق صباحاً والغرب مساءً، مما يؤدي إلى توسيع مساحة المنطقة الصفراء على طرفي المنحنى.



شكل رقم (4): محاكاة القدرة الإشعاعية الساقطة في الربيع.

رابعاً: الأداء في فصل الخريف: على الرغم من التطابق الفلكي التام بين مسار الشمس في الاعتدالين الربيعي والخريفي (من حيث زوايا الشروق والغروب وأقصى ارتفاع وقت الظهيرة)، إلا أن نتائج المحاكاة المبينة بالشكل رقم (5) أظهرت كسباً إشعاعياً في فصل الخريف (شهر سبتمبر) بلغ **15.22%**، وهو أقل نسبياً من الكسب المحقق في فصل الربيع، في فصل الخريف، تختلف مستويات الإشعاع الشمسي المباشر **(DNI)** وكثافة الغيوم العابرة مقارنة بفصل الربيع، مما يؤثر على إجمالي الإشعاع المتاح، يظهر منحنى الخريف نفس السلوك التشغيلي؛ حيث يتقارب أداء اللوح الثابت مع المتتبع الذكي وقت الظهيرة نظراً لاقتراب زاوية السقوط **(AOI)** للوح الثابت من الوضع العمودي، وتتركز كفاءة النظام الذكي في ملاحقته السلسة لأشعة الشمس المائلة في فترات الصباح الباكر وما قبل الغروب، كما تؤكد التعرجات الحادة في المنحنى قدرة الشبكة العصبية على التكيف اللحظي مع التقلبات الخريفية السريعة للطقس، وعدم فقدان التوجيه الصحيح رغم التشتت الإشعاعي.



شكل رقم (5): محاكاة القدرة الإشعاعية الساقطة في الخريف.

3.4 المحصلة السنوية للجدوى الهندسي:

تم دمج نتائج المحاكاة لكل ساعة على مدار 8784 ساعة (عام 2024 كاملاً)، أثبتت التحليلات أن استخدام خوارزمية الشبكات العصبية (ANN) للتحكم في التتبع الشمسي حقق متوسط زيادة سنوية إجمالية بنسبة 25.60% في الإشعاع الساقط مقارنة بالنظام الثابت.

ومن الناحية الهندسية والاقتصادية لتصميم محطات الطاقة، يجب خصم الطاقة التشغيلية التي تستهلكها المحركات الميكانيكية والتي تقدر بـ 2%، وبناءً عليه، يبلغ الكسب الصافي الفعلي للنظام المقترح حوالي 23.60%.

تؤكد هذه النتيجة أن استبدال المستشعرات الضوئية (LDRs) التي تتطلب صيانة مستمرة وتنظيفاً من الغبار بوحدة تحكم ذكية تعتمد على التنبؤ المستقل للشبكات العصبية، يقدم حلاً موثوقاً ومجدياً اقتصادياً لتعزيز كفاءة محطات الطاقة الشمسية في البيئة الليبية.

5. الخاتمة والتوصيات

بعد استكمال كافة مراحل هذا البحث، وبناءً على المعطيات والتحليلات الفنية التي تمت مناقشتها في الفصل السابق، يمكن تلخيص أهم الاستنتاجات التي تم التوصل إليها في النقاط التالية:

1. أظهرت استراتيجية التدريب نقل التعلم (الاعتماد على المعادلات الرياضية أولاً، ثم بيانات الأقمار الصناعية ثانياً كفاءة عالية فقد حقق النظام معامل دقةبلغ **96.97%**، مما

يثبت قدرة الشبكة العصبية على استيعاب التشويش الحقيقي للغلاف الجوي والتكيف مع الانكسارات الضوئية الواقعية.

2. رغم تسجيل نسبة خطأ قياسية **(NRMSE)** بلغت 6.23% في توجيه زاوية الارتفاع، إلا أن هذه النسبة تعادل فعلياً انحرافاً يقارب 4.6 درجة فقط من إجمالي النطاق الحركي للشمس وقد أثبت التحليل الرياضي للفقد الجيبي **(Cosine Loss)** أن هذا الانحراف الطفيف يُبقي نسبة استقبال الإشعاع أعلى من 99.6%.

3. أظهرت المحاكاة استجابة لتعاقب الفصول؛ حيث حقق النظام أقصى كسب إشعاعي في فصل الصيف بزيادة بلغت 66.79% (نظراً لتعامد الشمس وطول مسارها)، بينما انخفض الكسب في الشتاء إلى 3.77% (لوجود اللوح الثابت في زاوية ميل مثالية للشتاء).

4. حقق نظام التتبع الذكي متوسط زيادة إجمالية في الإشعاع الساقط بلغ 25.60% سنوياً، وعند خصم الحمل الافتراضي للمحركات المقدر بـ 2%، يظل الكسب الصافي 23.60%، يعني هذا الكسب إمكانية تقليل مساحة الألواح المطلوبة في محطات التوليد بمدينة مصراتة بنسبة الربع تقريباً للحصول على نفس القدرة الإنتاجية، مما يخفض التكلفة الرأسمالية للمشاريع.

6. المراجـــــع

[1] Jamal B. Oheba , " Solving Assignment Problems Using the Black Hole Optimization in R", Journal of Technology Research (JTR), Volume 4, Issue 1, (2025), pp 012-023, ISSN 3005-639X.

[2] Flocking-Inspired Solar Tracking System with Adaptive Performance in Varied Environmental Conditions (Khadidja Dahli, Adrian Ilinca, Abdellah Benallal, Nawal Cheggaga, Tayeb Allaoui) (2025).

[3] Design of AI Based Solar Tracking System (Atharv Yegade, Mukesh Prajapati, Md Kaif Khumra) (2024).

[4] Solar tracking systems: Advancements, challenges, and future directions: A review (Krishna Kumba, Patri Upender, Parusharamulu Buduma, Mithu Sarkar, Sishaj P. Simon, Venkateswarlu Gundu) (2024).

[5] The Analysis of Dual Axis Solar Tracking System Controllers Based on Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS) (M.S.I Zulkornain, S.Z. Mohammad Noor, N.H. Abdul Rahman, Suleiman Musa) (2023).

[6] Intelligent solar panel monitoring system and shading detection using artificial neural networks (Fahad Saleh M. Abdallah, M.N. Abdullah, Ismail Musirin, Ahmed M. Elshamy) (2023).

[7] Design and Implementation of a Dual-Axis Solar Tracking System (Huilin Shang, Wei Shen) (2023).

[8] Cloud Powered AI Based Solar Tracker (AhmedUvesh Mevawala, Subhadip Ghosh, Harshaprabha N shetty, Tanusree De) (2022).

[9] Design and study of the performance of a dual-axis solar tracking system for the climate of Eastern Libya (Ali Najim Abdullah Saieed, Monaem Elmnifi, Abdalla Saad Ahmed Eltawati, Salem E Salem Elzwa, Yasir Ali Mezaal, Laith Jaafer Habeeb) (2022).

[10] More Efficiency of Solar Energy System in Libya Using Artificial Intelligence (Fuzzy Logic Control) (Esmail Mohmmed) (2022).

[11] Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review (Nadia AL-Rousan, Nor Ashidi Mat Isa, Mohd Khairunaz Mat Desa) (2018).