

Improving the efficiency of the Photovoltaic-Electrolyzer with a new model for Artificial Neural Tracker based on Short Circuit Current Technique

Dr. Imane Dilaneh*

(Received 24 / 2 / 2021. Accepted 23 / 12 / 2021)

□ ABSTRACT □

This research deals with the improvement of the performance of an alkaline water analyzer system, indirectly coupled with a photovoltaic system. This done by using a neuron tracker based on a neuronal current estimator, and a variable step algorithm for estimating the duty cycle used to adjust the the DC-DC Converter in a Matlab/Simulink environment, to track the maximum power point of the PV system. As a result, providing the largest possible energy to the alkaline the alkaline Electrolyzer, to raise and improve the hydrogen productivity under the available solar irradiance conditions. In this context, the paper presents a new model for a neuronal current estimator, to rapidly and directly estimate the short circuit current, without the need for periodic separation of the PV system from the load to measure the short circuit current, thus avoiding the resulting power loss. So, the optimum operating current for a PV system can be easily determined for tracker MPP point. The research also proposes algorithm, operating with variable step size, to improve the dynamic performance of the tracker, to achieve the adjustment of the duty cycle of the voltage changer, while tracking the MPP point, and to secure the maximum power transfer to the alkaline Electrolyzer from the PV system. The simulation results of the Photovoltaic-Electrolysis system performed in the Matlab/Simulink environment, showed that the proposed neural Tracker achieves an optimal performance of the operation of the indirectly coupled photoelectric system compared to the direct coupling condition without a tracker and without a voltage converter.

Keywords: Photovoltaic-Electrolyzer, Alkaline Electrolyzer, Indirect Coupling, Artificial Neural Tracker, Short Circuit Current Technique, DC-DC Converter.

* Associate Professor, Department of Mechanical Power Engineering, faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. imanedilaneh@gmail.com

تحسين كفاءة محطة كهروضوئية باستخدام نموذج جديد لمتتبع عصبوني مرتكز على تقنية تيار دائرة القصر

د. إيمان ديلانة*

(تاريخ الإيداع 24 / 2 / 2021. قُبل للنشر في 23 / 12 / 2021)

□ ملخص □

يتناول البحث تحسين أداء محطة ماء قلووية مقترنة بشكل غير مباشر مع نظام كهروضوئي (Photovoltaic System, PV)، باستخدام متتبع عصبوني مرتكز على مقدر تيار عصبوني، وخوارزمية متغيرة الخطوة لتقدير نسبة التشغيل المستخدمة لضبط دورة عمل مبدل جهد مستمر في بيئة Matlab/Simulink، لتتبع نقطة الاستطاعة العظمى لنظام PV (Maximum Power Point, MPP). وبالنتيجة، تقديم أكبر طاقة ممكنة للمحطة القلووية، لرفع وتحسين إنتاجية الهيدروجين في ظروف الإشعاع الشمسي المتوافرة. في هذا السياق، يقدم البحث، نموذج جديد لمقدر تيار عصبوني، لتحديد تيار دائرة القصر بشكل سريع ومباشر، دون الحاجة للفصل الدوري للنظام PV عن الحمل لقياس تيار دائرة القصر، مما يجنب الفقد الناتج في الطاقة. إذا، يمكن بسهولة تحديد تيار التشغيل الأمثل لنظام PV لتتبع نقطة MPP. كما يقترح البحث خوارزمية عاملة بخطوة متغيرة لنسبة التشغيل، لتحسين الأداء الديناميكي للمتتبع، ولتحقيق ضبط دورة عمل مبدل الجهد، أثناء تتبع نقطة MPP، ولتأمين نقل الطاقة العظمى إلى المحطة القلووية من نظام PV. أظهرت نتائج المحاكاة لنظام التحليل الكهروضوئي المنجز في بيئة Matlab/Simulink، أن المتتبع العصبوني المقترح يحقق لأداء الأمثل لعمل نظام التحليل الكهروضوئي المقترن بشكل غير مباشر مقارنة مع حالة الاقتران المباشر بدون متتبع وبدون مبدل جهد.

الكلمات المفتاحية: محطة كهروضوئية، محطة قلووية، الاقتران غير المباشر، متتبع عصبوني، تقنية تيار دائرة القصر، مبدل جهد المستمر.

*أستاذ مساعد- قسم هندسة القوى الميكانيكية -كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
imanedilaneh@gmail.com

مقدمة:

يعتبر توليد وقود الهيدروجين باستخدام تقنيات تحليل الماء الكهربائية أو ما يسمى محلات الماء، اعتماداً على الطاقة الكهروضوئية من أكثر الحلول العملية للحصول على هيدروجين أخضر صديق للبيئة، باعتبار أنه لا ينتج عن عملية توليده بتلك التقنيات أي ملوثات ضارة للبيئة. بالإضافة لذلك، تعتبر الطاقة الكهروضوئية، طاقة مجانية لاعتمادها على الإشعاع الشمسي لتوليد الطاقة. هذا كله يجعل الهيدروجين الشمسي، وسيط تخزين فعال للطاقة الكهروضوئية. تعتمد كفاءة عملية التحليل الكهروضوئي، على طريقة الاقتران للمحطة مع نظام PV. في حال لاقتران المباشر بينهما، أي بدون استخدام مبدلات قدرة الكترونية وأجهزة تحكم، تعتبر كفاءة عملية إنتاج الطاقة منخفضة، نتيجة عدم تطابق نقطة العمل للمحطة ونظام PV، وذلك أيضاً نتيجة لتغير منحنيات التوتر والتيار لكل منهما مع تغير الشروط الجوية من درجة حرارة وشدة إشعاع شمسي [1,2,3]. لكن على الرغم من ذلك، تشكل كل من الكلفة المنخفضة والبساطة في التصميم لهذا النوع من الأنظمة، دافع لدى العديد من الباحثين في مجال الطاقة لاقتراح حلول تحسين من كفاءة انتاجيتها [4,5]. من جهة أخرى، تحقق أنظمة التحليل الكهروضوئي ذات الاقتران غير المباشر، المجهزة بمبدلات قدرة الكترونية ومنتبعات نقطة الاستطاعة العظمى (Maximum Power Point Tracker, MPPT) لنظام PV، كفاءة وموثوقية أفضل، وإنتاجية أكبر للهيدروجين [6,7].

درست العديد من الدراسات المرجعية، أنظمة المحلات الكهروضوئية. في الدراسة المرجعية [4]، تم دراسة تحسين إنتاجية الهيدروجين لنظام محلة قلووية مقترنة مباشرة مع نظام PV، باستخدام الخوارزميات الجينية. أما في الدراسة المرجعية [5]، فقد تم دراسة تأثير عدد من المتغيرات، تشمل كل من مساحة الأقطاب للمحطة، تركيز محلول الكهرليت، وشدة الإشعاع الشمسي، والتي تؤثر على إنتاجية وكفاءة محلة كهروضوئية في حالة الاقتران المباشر. أما في الدراسة المرجعية [6]، تم إجراء دراسة نظرية وتجريبية لاختبار أداء محلة كهربية ذات غشاء تبادل البروتون مقترنة بشكل غير مباشر مع نظام PV، مع استخدام متتبع تقليدي يعتمد تقنية الاضطراب والمراقبة (Perturb and Observe, P&O). أظهرت النتائج التقارب الدقيق بين نتائج القيم النظرية والقياسات التجريبية لتيار ولتوتر المحطة، الناتجة عند تغير درجة حرارة التشغيلية. كذلك، تم في الدراسة المرجعية [7]، تطبيق خوارزمية P&O، والتي ساهمت في تحسين كفاءة النظام PV، ولكن هذه الدراسة لم تتناول دراسة كفاءة عملية التحليل الكهربائي وتأثيرها على كفاءة عملية التحليل الكهروضوئي للنظام. من هذه الدراسات المرجعية، يمكن القول بأن كفاءة وإنتاجية المحطة ترتبط مباشرة بالطاقة المقدمة من النظام PV، والتي يمكن زيادتها للقيمة العظمى باستخدام متتبع ذو أداء عال.

أهمية البحث وأهدافه:

يتناول البحث دراسة تحسين أداء نظام محلة ماء قلووية-نظام كهروضوئي باستخدام متتبع عصبوني مركّز على مقدر تيار عصبوني، وخوارزمية متغيرة الخطوة لتقدير نسبة التشغيل المستخدمة لضبط دورة عمل مبدل جهد مستمر في بيئة Matlab/Simulink، لتتبع نقطة MPP لنظام PV، وبالتالي تقديم أكبر طاقة ممكنة للمحطة القلووية، لرفع وتحسين إنتاجية الهيدروجين في ظروف الإشعاع الشمسي المتوافرة. في هذا السياق، يقدم البحث، نموذج جديد لمتتبع باستخدام الشبكات العصبونية الصناعية (Artificial Neural Networks, ANN)، لتقدير تيار دائرة القصر (Short Circuit Current, I_{sc}) بشكل سريع ومباشر، دون الحاجة للفصل الدوري للنظام PV عن الحمل أثناء عملية قياس

تيار دائرة القصر. مما يجنب الفقد في الطاقة الناتجة عن عملية القياس ويرفع كفاءة أداء المتتبع العصبوني. بالتالي، يمكن بسهولة تحديد تيار التشغيل الأمثل لنظام PV لتتبع نقطة MPP. كما يقترح البحث خوارزمية عاملة بخطوة متغيرة لنسبة التشغيل، لتحسين الأداء الديناميكي للمتتبع. بالتالي، يمكن للمتتبع العصبوني المقترح (Developed MPPT-ANN, DMPPT-ANN) تحقيق الأداء الأمثل لعمل نظام التحليل الكهروضوئي المقترن بشكل غير مباشر. مقارنة مع حالة الاقتران المباشر بدون متتبع وبدون مبدل جهد.

طرائق البحث ومواده:

يعتمد تشكيل نموذج المتتبع العصبوني المقترح، على استخدام توابع معرفة في مكتبة Neural Network Toolbox من بيئة Matlab. يتم كذلك اختبار وتقييم أداء نظام التحليل الكهروضوئي باستخدام المتتبع العصبوني المقترح وبالاعتماد على نموذج المحاكاة للنظام المنجز في بيئة Matlab/Simulink.

1- محلات الماء القلوية

تصنف أجهزة التحليل الكهربائي للماء أو اختصارا محلات الماء، وفق الأنواع التالية: المحلات ذات المحلول القلوي، المحلات ذات الغشاء البوليميري، المحلات ذات الأوكسيد الصلب. تعتبر محلات الماء القلوية الأكثر استخداما، لأنها أكثر اقتصادية، وذات كفاءة جيدة [8]. حيث تصنع أقطاب المحلات القلوية من خلاط النيكل والكوبالت للمصعد، والنيكل أو الفولاذ غير القابل للصدأ للمهبط. أما للمحفزات فلا حاجة لاستخدام معادن نبيلة عالية الثمن كما هو الحال في المحلات ذات الغشاء البوليميري. تستخدم المحلات القلوية، كهليليت عبارة عن محلول قلوي من هيدروكسيد البوتاسيوم KOH، بتركيز % (25-35)، ويعمل هذا الكهليليت على تمرير الأيونات المشحونة إيجابيا ويمررها من قطب الآخر وبتجاه واحد. تعمل كل من محلات القلوية وذات الغشاء البوليميري عند درجات حرارة تشغيلية منخفضة من 50 إلى 80 درجة مئوية، وكفاءة تصل بين % (70-80). أما النوع الثالث من المحلات فما زال قيد البحث والتطوير ويتطلب درجات حرارة تشغيلية عالية بين 700 و 900 درجة مئوية، مع كفاءة عالية تصل إلى %100 [8,11].

2- النموذج الرياضي للمحطة الكهربية القلوية

يتطلب حدوث التفاعل الكيميائي لتفكيك جزيئات الماء إلى هيدروجين وأوكسجين، تطبيق توتر مستمر لا يقل عن $1.482(V)$ ، وعمليا يكون أكبر من ذلك لتغطية هبوطات التوتر الناتجة عن مختلف المقاومات الداخلية لمكونات المحل، ويكون للمحلات العملية عادة توتر تشغيل بين $(1.75-2)$ فولت وذلك للخلاية الواحدة. يحدد توتر التشغيل للخلاية الواحدة من المحطة باستخدام العلاقة اللاخطية التالية الناتجة تجريبيا [8]:

$$V_{cell} = V_0 + s * \log \left(\frac{t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2}}{A} * I_{ele} + 1 \right) + \frac{r_1 + r_2 * T}{A} * I_{ele} \quad (1)$$

$$V_{ele} = N_{ele} * V_{cell} \quad (2)$$

يمثل V_{cell} و I_{ele} ، توتر وتيار خلية المحطة الكهربية على التوالي. كما تمثل N_{ELE} عدد خلايا المحطة الموصولة على التسلسل، للحصول على الجهد الكهربي V_{ele} . يقاس التيار بالأمبير [A] والتوتر بالفولت [V]. بينما يمثل V_0 توتر التشغيل الأدنى المحطة المحدد عند الشروط التشغيلية القياسية الموافقة لدرجة الحرارة $T = 25 [^{\circ}C]$ ، والضغط

$P = 1[atm]$. تمثل A مساحة سطح الأقطاب الكهربائية للمحلة. تمثل البارامترات التالية: $s, t_1, t_2, t_3, r_1, r_2$ ثوابت تعتمد قيمتها على نوع المحلة الكهربائية قلبية أو ذات الغشاء البوليميري، وتتعلق قيمتها أيضا بالخصائص الكهربائية للمحلة مثل تغير المقاومة الكهربائية وتوتر التنشيط عند تغير درجة الحرارة التشغيلية. بينما يمثل η_F عامل الكفاءة والذي يسمى بعامل كفاءة فاراداي:

$$\eta_F = \frac{\left(\frac{I_{ele}}{A}\right)^2}{f_1 + \left(\frac{ele}{A}\right)^2} * f_2 \quad (3)$$

f_2, f_1 بارامترات تتعلق قيمتها بدرجة الحرارة التشغيلية للمحلة [8]، حيث عند درجة حرارة تشغيل $T = 80C^\circ$ تكون $f_2 = 0.980, f_1 = 250mA/cm^2$. يحدد معدل التدفق المولي للهيدروجين $q_{H_2}[mol/s]$ الناتج عن عملية التحليل الكهربائي للماء، بالعلاقة التالية [8]:

$$q_{H_2} = \eta_F \frac{N_{ele} * I_{ele}}{2 * F} \quad (4)$$

حيث يمثل F ثابت فاراداي. كما يحدد معدل التدفق المولي لكل من الأوكسجين الناتج q_{O_2} ، وللماء المستهلك q_{H_2O} أثناء عملية التحلل الكهربائي، وفق ما يلي:

$$q_{H_2O} = q_{H_2} = 2 * q_{O_2} \quad (5)$$

3- النموذج الرياضي لنظام PV، وتحديد نموذج تيار دائرة القصر

يحدد النموذج الرياضي للنظام PV، باستخدام العلاقة اللاخطية التالية التي تحدد العلاقة بين التيار I_{PV} والتوتر V_{PV} لخرج النظام PV، وذلك بإهمال المقاومات التسلسلية والتفرعية [9]:

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{V_{PV}}{V_t}\right)} - 1 \right) \quad (6)$$

$$I_{Ph} = (I_{Ph,N} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_N} \quad (7)$$

حيث يقاس التيار بالأمبير [A] والتوتر بالفولت [V]. كما يمثل $I_{Ph}[A]$ التيار الضوئي المتولد، $I_{Ph,N}[A]$ التيار الضوئي المتولد عند الشروط القياسية الموافقة لشدة إشعاع شمسي $G_N = 1000[W/m^2]$ ودرجة حرارة الخلية الشمسية $T_N = 25[^\circ C]$. يمثل $I_0[A]$ تيار الإشباع العكسي، V_t الجهد الحراري. يمثل $G[W/m^2]$ شدة الإشعاع الشمسي و $T[^\circ C]$ درجة حرارة الخلية الشمسية، K_I المعامل الحراري للتيار.

عند نقطة تيار دائرة القصر، تكون قيمة توتر خرج النظام PV معدومة ($V_{PV} = 0$) [10]. بالتالي، بتعويض قيمة $V_{PV} = 0$ في العلاقة (6)، ومنه يمكن استنتاج أن قيمة تيار دائرة القصر I_{sc} تعطى بدلالة التيار الضوئي المتولد I_{Ph} المعطى بالعلاقة (7). وبناء على ذلك، يحدد تيار دائرة القصر I_{sc} بالعلاقة التالية:

$$I_{sc} = I_{Ph} = (I_{Ph,N} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_N} \quad (8)$$

وبذلك نكون استنتجنا نموذج رياضي لتحديد تيار دائرة القصر I_{sc} ، مباشرة، دون الحاجة لإجراء عملية الفصل الدوري للنظام عن الحمل لقياسه. وكذلك، يمكننا تحديد تيار نقطة الاستطاعة العظمى I_{mpp} ، وذلك بالاستفادة من نتيجة الدراسات التجريبية، التي أظهرت أن العلاقة بين تيار التشغيل الأمثل I_{mpp} ، وتيار دائرة القصر I_{sc} ، هي علاقة خطية تناسبية ومعبر عنها كما يلي [10]:

$$I_{mpp} = K * I_{sc} \quad (9)$$

يمثل K ثابت تناسب قيمته أصغر من الواحد، وتعتمد قيمته على الخصائص الكهربائية للوح الشمسي.

4- نموذج مقدر التيار العصبوني المستخدم لتقدير تيار دائرة القصر

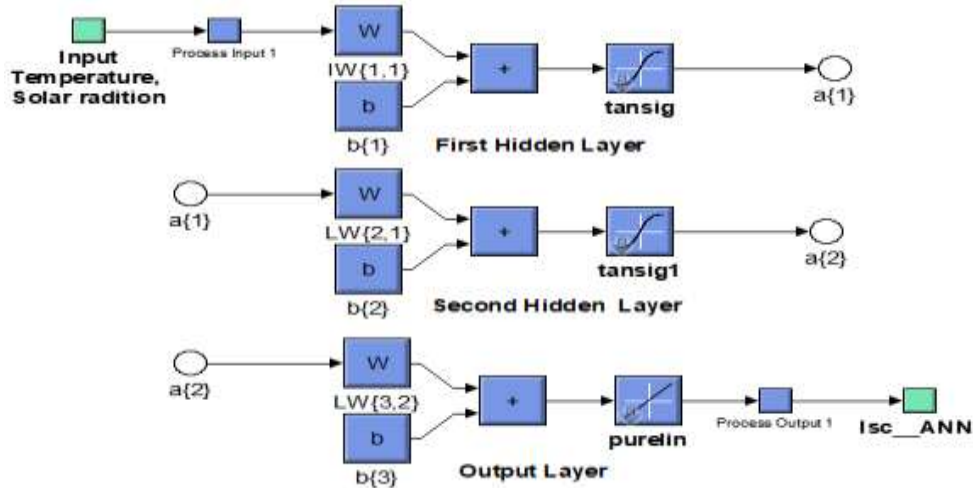
يتم تشكيل نموذج المقدر العصبوني لتحديد قيم تيار دائرة القصر، اعتماداً على استخدام النموذج الرياضي لتيار دائرة القصر المعطى بالعلاقة (8). مما يمكن من الحصول على قاعدة بيانات لتدريب الشبكة العصبونية الصناعية، الناتجة مع متغيرات الدخل الموافقة لكل من درجة حرارة الخلية الشمسية، وشدة الإشعاع الشمسي. بينما يشكل تيار دائرة القصر متغير الخرج للشبكة. يتم نمذجة الشبكة في بيئة Matlab ، باستخدام التابع "newff" ، مع التابع "trainlm" الممثل لخوارزمية التدريب العكسي "Levenberg Marquardt". يتم تحديد عدد طبقات الشبكة وعدد العصبونات الموجودة فيها أثناء التدريب، باختيار الشبكة التي تمتلك القيم الأصغر لمتوسط مربع الخطأ (MSE, Mean square error) والقيم المساوية للواحد لمعامل الارتباط (R, Correlation Coefficient) ، والتي تحدد بالعلاقات التالية [11]:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N (\bar{I}_{scK} - I_{scK})^2 \quad (10)$$

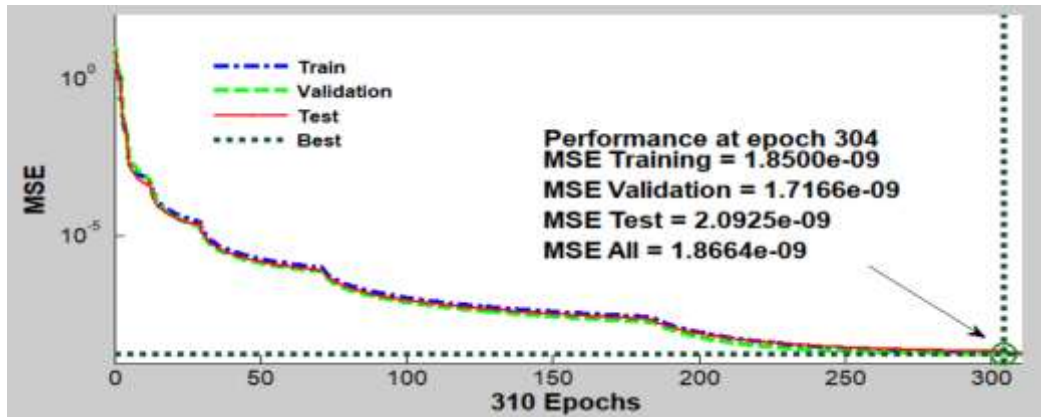
$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{K=1}^N (I_{scK} - \bar{I}_{scK})^2}{\sum_{K=1}^N (I_{scK} - \bar{I}_{scK})^2}} \quad (11)$$

$$\bar{I}_{scK} = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N I_{scK} \quad (12)$$

حيث I_{scK} تمثل القيم الحقيقية I_{sc_Target} و \bar{I}_{scK} تمثل القيم المقدرة I_{sc_ANN} ، الناتجة من نموذج الشبكة. أما \bar{I}_{scK} تمثل المتوسط الحسابي للقيم الحقيقية للخروج I_{scK} والتي عددها يساوي N . يتم اختيار الهيكلية للشبكة من حيث عدد الطبقات الخفية، وعدد العصبونات في كل طبقة بالتجريب. يتم بداية زيادة عدد العصبونات والطبقات بالتدرج مع حتى الوصول لأصغر قيم ممكنة لمتوسط مربع الخطأ MSE، وقيم مساوية للواحد لمعامل الارتباط R، مع مراعاة عدم الزيادة في حجم وتعقيد الشبكة العصبونية. في حالتنا تم التوقف عند هيكلية للشبكة تحوي عصبونات في الطبقة الخفية الأولى، وعشرة عصبونات في الطبقة الخفية الثانية، والتي تحقق قيم جيدة لكل من MSE و R: $R=1$ ، $MSE=1.8664e-09$ ، وبذلك نتجنب زيادة حجم الشبكة.

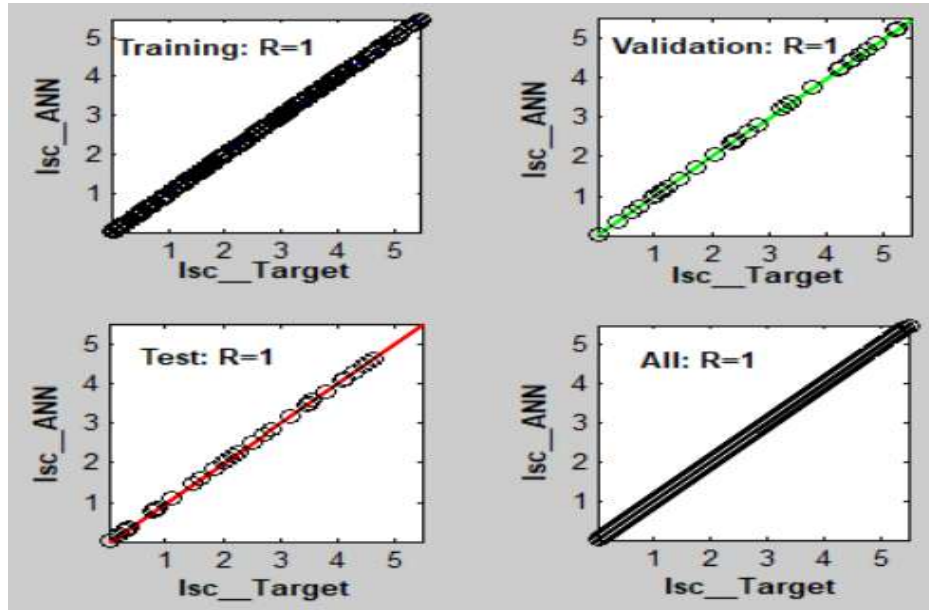


الشكل (1) التركيب الداخلي للشبكة المختارة لتقدير التيار I_{sc_ANN} الناتجة في بيئة Matlab.



الشكل (2) منحنى الأداء للشبكة العصبونية المستخدمة لتقدير I_{sc_ANN} .

يبين الشكل (1)، بنية الشبكة المختارة المشكلة لنموذج مقدر التيار العصبوني. والتي تحوي طبقتين خفيتين مع طبقة خرج، حيث تم اعتماد تابع التنعيل 'tansig' سيغمويد (تابع الظل القطعي) في الطبقات الخفية، والتابع التنعيل الخطي 'purelin'. في طبقة الخرج. يبين الشكل (2)، منحنيات أداء الشبكة العصبونية المختارة ممثلة بمنحنيات متوسط مربع الخطأ لكل من مراحل التدريب (Train)، عملية اختبار صلاحية الشبكة العصبونية أي التحقق (Validation)، عملية الاختبار (Test)، مع منحنى القيم الأفضل (Best). يظهر على الشكل (2)، القيم النهائية الصغرى الناتجة لقيم متوسط مربع الخطأ MSE لكل من المراحل المذكورة.



الشكل (3) معاملات الارتباط للشبكة العصبونية المستخدمة لتقدير I_{sc_ANN} .

يظهر الشكل (3)، قيمة معاملات الارتباط R للمجموعات الثلاث (التدريب-التحقق-الاختبار) المساوية للواحد. وهذا يظهر الترابط الخطي بين القيم النظرية I_{sc_Target} المستخدمة لتدريب الشبكة، والقيم المقدرة I_{sc_ANN} الناتجة من نموذج الشبكة. بالتالي، تظهر هذه النتائج أن الشبكة المختارة تمتلك معايير أداء جيدة لكل من MSE و R في نهاية عملية التدريب.

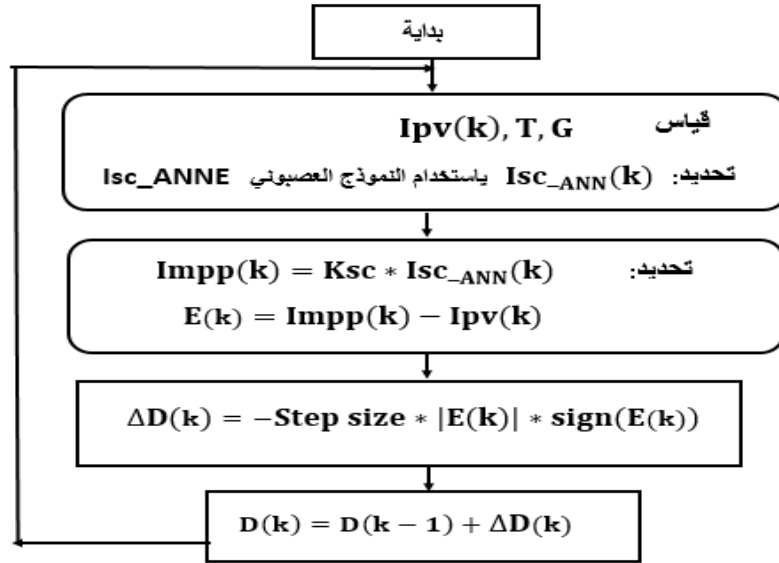
نستخدم في البحث، مبدل رافع الجهد المستمر، حيث تمثل متغيرات الدخل للمبدل الممثلة للتيار $I_{pv}[A]$ ، وللتوتر $V_{pv}[V]$ لخرج النظام PV، مع متغيرات خرج المبدل الممثلة لتيار الحمل $I_{out}[A]$ ولتوتر الحمل $V_{out}[V]$ ، ترتبط هذه المتغيرات بالعلاقات التالية:

$$\frac{I_{out}}{I_{pv}} = \frac{V_{pv}}{V_{out}} = 1 - D \quad (13)$$

نسبة التشغيل D: هي عدد لا بعدي تتراوح قيمته بين الصفر والواحد، حيث يستخدم تغير قيمة نسبة التشغيل لتعديل عرض النبضة (Pulse Width Modulation, PWM)، المستخدمة للتحكم في دورة عمل مبدل الجهد.

5- الخوارزمية المقترحة العاملة بخطوة متغيرة لنسبة التشغيل

نعمد الآن إلى اقتراح خوارزمية تستخدم لتحديد نسبة التشغيل المستخدمة للتحكم في دورة عمل مبدل الجهد لهذا، يتم استخدام الخطأ في التيار $E(k)$ الناتج بين القيم اللحظية لتيار التشغيل الأمثل المقدرة $I_{MPP_ANN}(k)$ ، وقيم التيار $I_{pv}(k)$ لخرج نظام PV. ليتم بناء على ذلك، تحديد مقدار تغير خطوة نسبة التشغيل $\Delta D(k)$ ، المتناسبة بالقيمة مع مقدار القيمة المطلقة للخطأ $|E(k)|$ ، والمعاكسة لإشارته التي تحدد بتابع الإشارة $\text{sign}(E(k))$. ليتم تحديد مقدار الزيادة أو النقصان في قيم نسبة التشغيل $D(k)$. من جهة أخرى، تتعلق سرعة عمل الخوارزمية بالاختيار الصحيح لمقدار تغير الخطوة 'Step Size' وهو مقدار موجب أصغر من الواحد، تحدد قيمته بالتجريب. حيث يؤثر الاختيار الصحيح لقيمته على سرعة تتبع نقطة MPP. يبين الشكل (5) محاكاة عمل المتتبع العصبوني المقترح، المرتكز على نموذج مقدر التيار العصبوني والخوارزمية المقترحة.



الشكل (4) خوارزمية التحكم المقترحة، المتغيرة الخطوة لنسبة التشغيل (Variable Step Size, VSS).

بالتالي، تحدد العلاقات اللازمة لتحديد نسبة التشغيل $D(k)$ وفق ما يلي:

$$I_{MPP}(k) = K_{sc} * I_{sc_ANN}(k) \quad (14)$$

$$E(k) = I_{MPP_ANN}(k) - I_{pv}(k) \quad (15)$$

$$\Delta D(k) = -\text{Step size} * |E(k)| * \text{sign}(E(k)) \quad (16)$$

$$D(k) = D(k-1) + \Delta D(k) \quad (17)$$

ومنه يمكن توضيح ما يلي:

- قيمة الخطأ موجبة $E(k) > 0$ ، ينتج أن $\Delta D(k) < 0$ ، يرافق هذا انخفاض في قيمة $D(k)$:

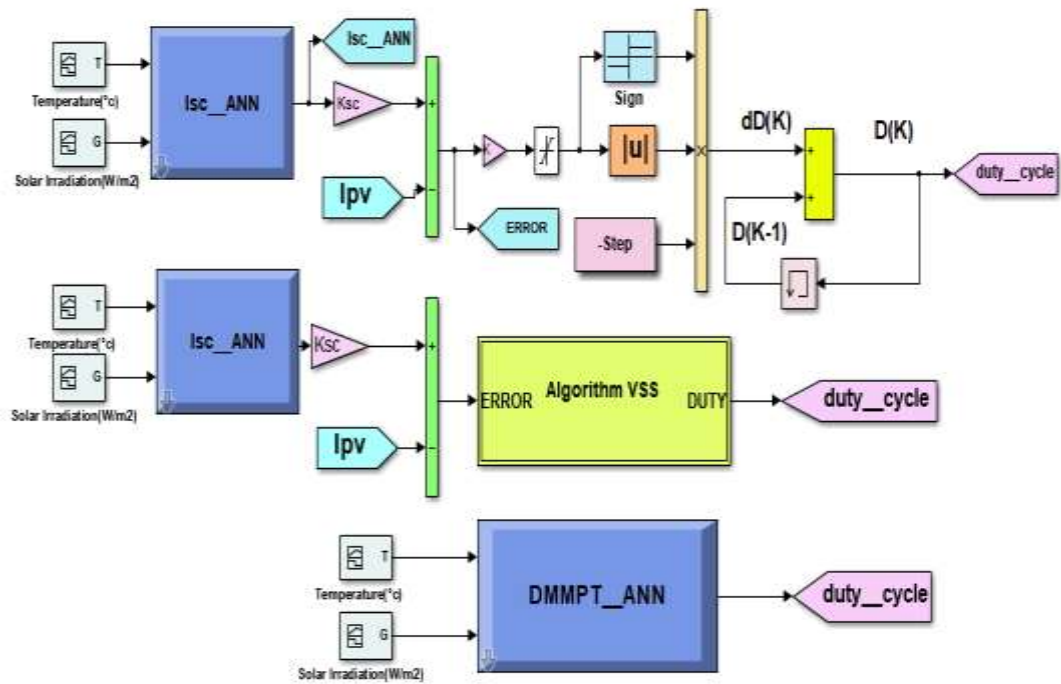
$$E(k) > 0 \Rightarrow \text{sign}(E(k)) = +1 \Rightarrow \Delta D(k) < 0$$

$$\Rightarrow \Delta D(k) = -\text{Step size} * |E(k)|; \quad (18)$$

- قيمة الخطأ سالبة $E(k) < 0$ ، ينتج أن $\Delta D(k) > 0$ ، يرافق هذا زيادة في قيمة $D(k)$:

$$E(k) < 0 \Rightarrow \text{sign}(E(k)) = -1 \Rightarrow \Delta D(k) > 0$$

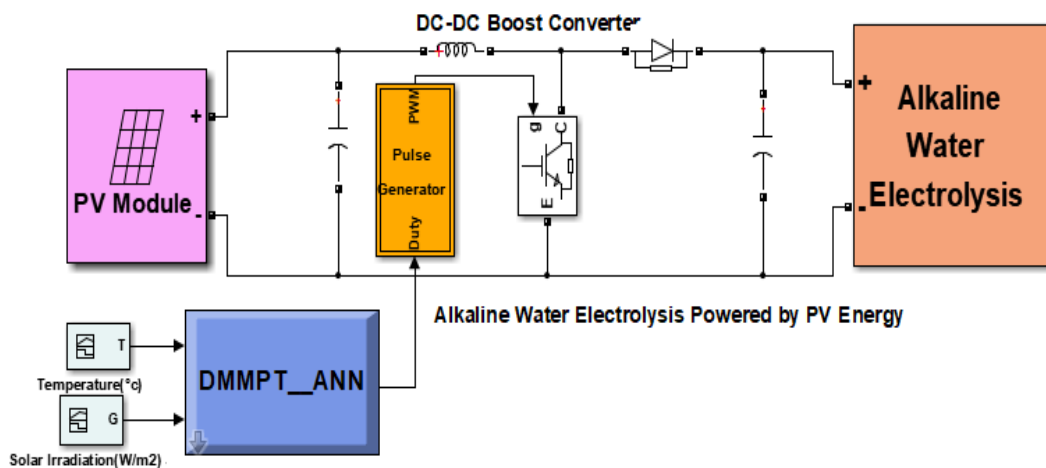
$$\Rightarrow \Delta D(k) = \text{Step size} * |E(k)|; \quad (19)$$



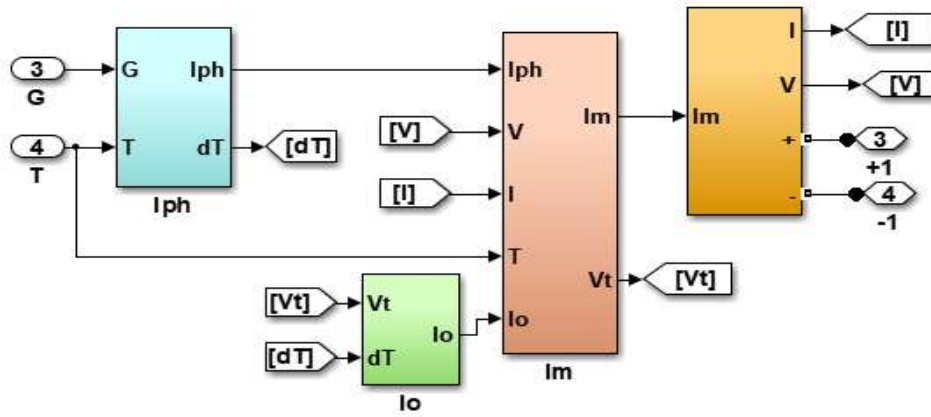
الشكل (5) محاكاة المتتبع DMPPT-ANN المرتكز على النموذج العصبي وخوارزمية التحكم المقترحة.

6- محاكاة نظام التحليل الكهروضوئي مع المتتبع المقترح

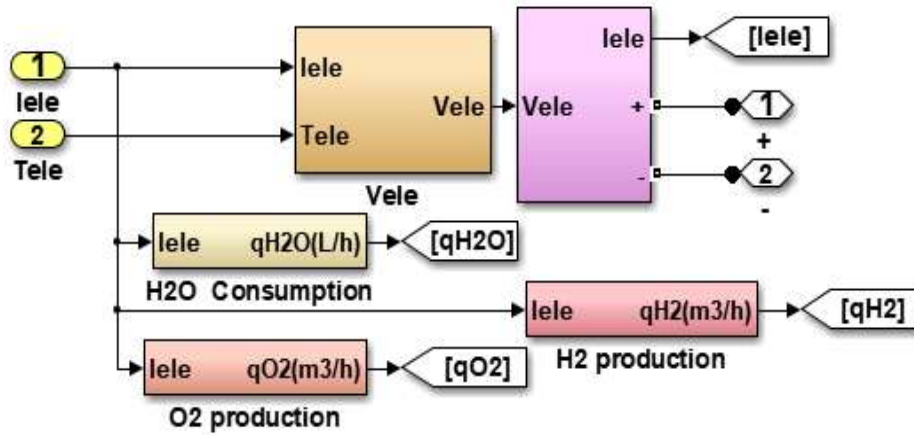
بين الشكل (6)، محاكاة نظام التحليل الكهروضوئي المدروس في حالة الاقتران غير المباشر، في بيئة Matlab/Simulink، واذي يتضمن حيث المكونات التالية: نظام PV، محللة قلووية، المتتبع المقترح، رافع الجهد، مولد نبضات PWM. يتكون نظام PV، من عشرون لوح شمسي موصولة على التفرع، باستطاعة كلية تساوي 2910 [W] محددة عند الشروط القياسية النظامية. بينما يساوي عدد خلايا المحللة القلووية إلى 35 خلية موصولة على التسلسل.



الشكل (6) محاكاة نظام التحليل الكهروضوئي مع المتتبع العصبي المقترح في بيئة Matlab/Simulink.



الشكل (7) محاكاة نظام PV في بيئة Matlab/Simulink.



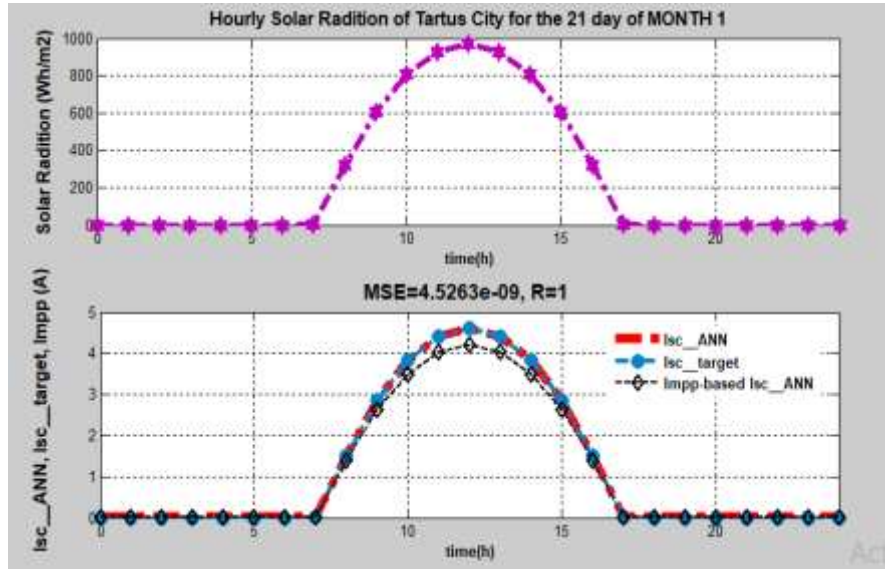
الشكل (8) محاكاة المحللة القلوية في بيئة Matlab/Simulink.

النتائج والمناقشة:

1- تقييم دقة نموذج مقدر التيار العصبوني في تقدير تيار دائرة القصر

يمكن اختبار الكفاءة العملية لنموذج مقدر التيار العصبوني، في تقدير قيم تيار دائرة القصر I_{sc_ANN} . ويتم ذلك، بمقارنة القيم المقدرة I_{sc_ANN} ، مع تلك النظرية I_{sc_target} الناتجة بتطبيق العلاقة الرياضية لتيار دائرة القصر المعطاة بالعلاقة (8)، عند شدة الإشعاع الشمسي المحسوبة لليوم 21 من شهر كانون الثاني لمدينة طرطوس، والمحددة عند زاوية ميل مساوية لزاوية خط عرض المدينة.

يظهر الشكل (9)، شدة الإشعاع الشمسي المحسوبة في البحث بتطوير برنامج في Matlab، والنتيجة بتطبيق معادلات شدة الإشعاع الشمسي. يظهر أيضا الشكل (9)، نتائج قيم التيار I_{sc_ANN} و I_{sc_target} مع القيم المحسوبة لكل من MSE و R. تظهر النتائج، التطابق الدقيق بين القيم الناتجة النظرية I_{sc_target} والمقدرة I_{sc_ANN} . يظهر الشكل (9)، قيم تيار التشغيل الأمثل I_{MPP} ، الناتجة بتطبيق العلاقة (9) وبدلالة القيم المقدرة I_{sc_ANN} الناتجة. بالتالي، هذا يبين أهمية النموذج العصبوني المستخدم في تقدير I_{sc_ANN} مباشرة، دون الحاجة للفصل الدوري للنظام PV، لقياس تيار القصر، ومن ثم تحديد التيار I_{MPP} المستخدم لاحقا لتتبع نقطة MPP.



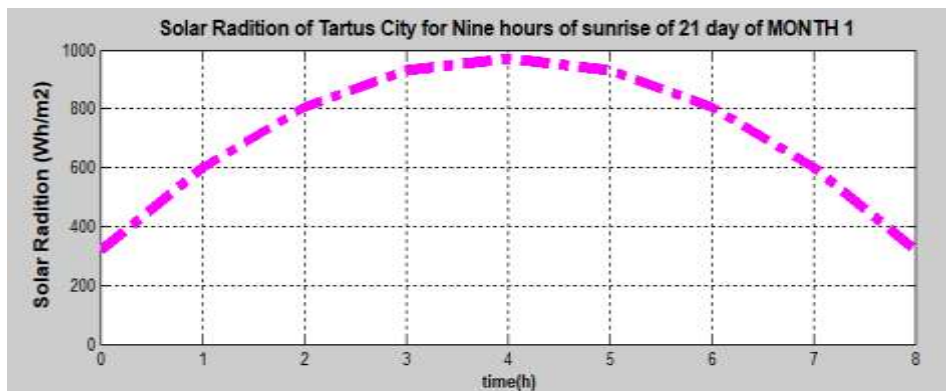
الشكل (9) شدة الإشعاع الشمسي لليوم 21 من الشهر 1، القيم الناتجة لتيار دارة القصر المقدر والنظرية، تيار التشغيل الأمثل.

2- تقييم أداء نظام التحليل الكهروضوئي باستخدام المتتبع المقترح

نقوم الآن بتحليل واختبار كفاءة أداء نظام التحليل الكهروضوئي باستخدام المتتبع العصبي المقترح-DMPPT-ANN في بيئة Matlab/Simulink. لذلك نقارن نتائج المحاكاة الناتجة مع حالات استخدام متتبع عصبي مرجعي MPPT-ANN مرتكز على تقنية الاضطراب والمراقبة [12]، ومع حالة الاقتران المباشر للمحللة القلوية مع نظام PV أي بدون متتبع MPPT-Without.

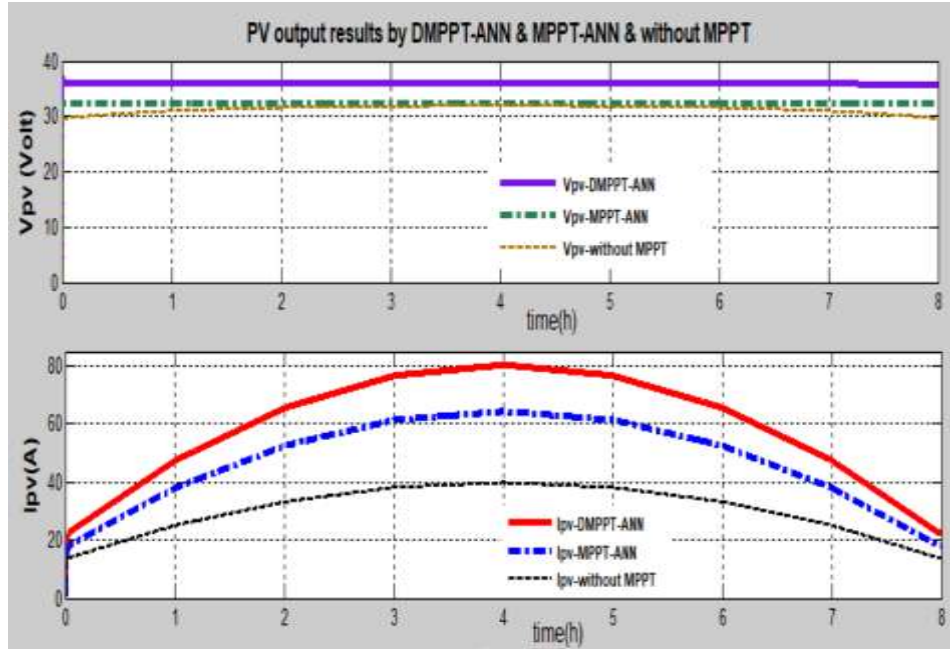
2-1 نتائج المحاكاة لخرج نظام PV ودخل المحللة القلوية عند تتبع نقطة MPP

نستخدم في المحاكاة، قيم الإشعاع الشمسي المحسوبة لليوم 21 من شهر كانون الثاني لمدينة طرطوس، حيث نختار المجال الزمني لمدة تسع ساعات خلال النهار، الموافقة لساعات السطوع الشمسي من الساعة الثامنة صباحا حتى السادسة عشر فقط، كما هو مبين في الشكل (10)، لانعدام استطاعة نظام PV خارج هذا المجال.

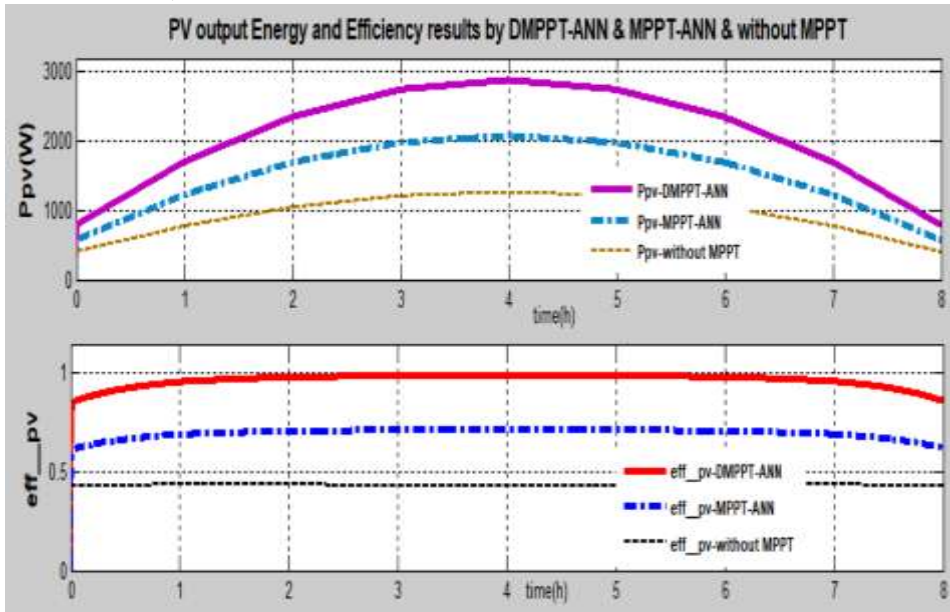


الشكل (10) شدة الإشعاع الشمسي لليوم 21 من شهر كانون الثاني الموافق لساعات السطوع الشمسي.

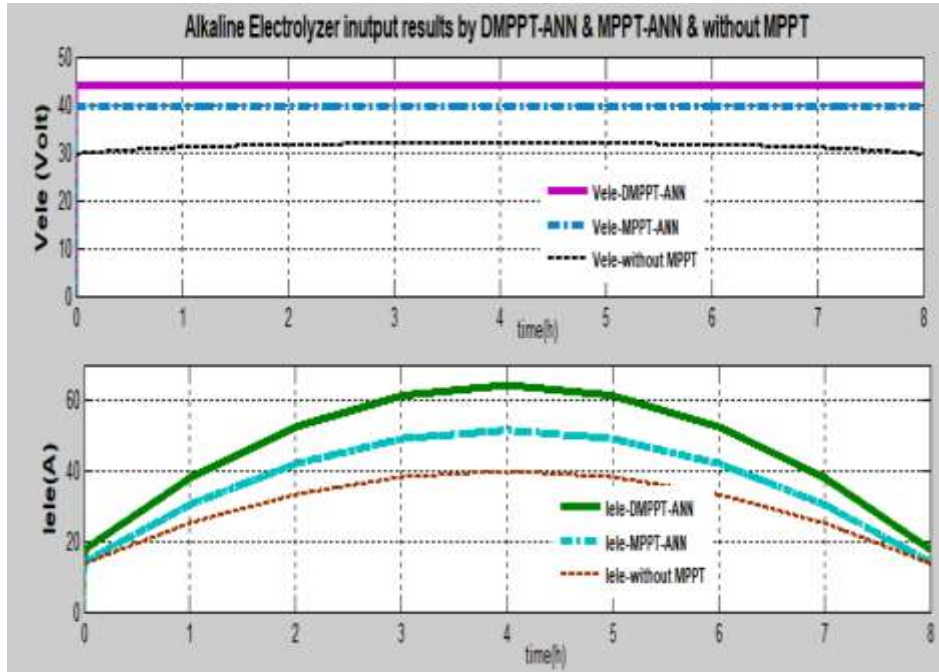
يظهر الشكل (11)، مقارنة نتائج التوتر، والتيار لخرج نظام PV الناتجة عند تتبع نقطة MPP لنظام PV، باستخدام المتتبع المقترح والمرجعي وبدون متتبع، خلال ساعات السطوح الشمسي. كما يظهر الشكل (12)، مقارنة نتائج قيم الطاقة الكهربائية الناتجة من نظام PV، بالإضافة، لكفاءة تتبع MPP لنظام PV والتي تنتج بقسمة طاقة خرج نظام PV الناتجة على الطاقة النظرية العظمى الموافقة. من جهة أخرى، يظهر الشكل (13)، نتائج التوتر، والتيار للمحطة القلوية. أما الشكل (14)، يظهر مقارنة نتائج الطاقة الكهربائية المنقولة للمحطة القلوية، مع نسب التشغيل الناتجة باستخدام المتتبع المقترح والمرجعي.



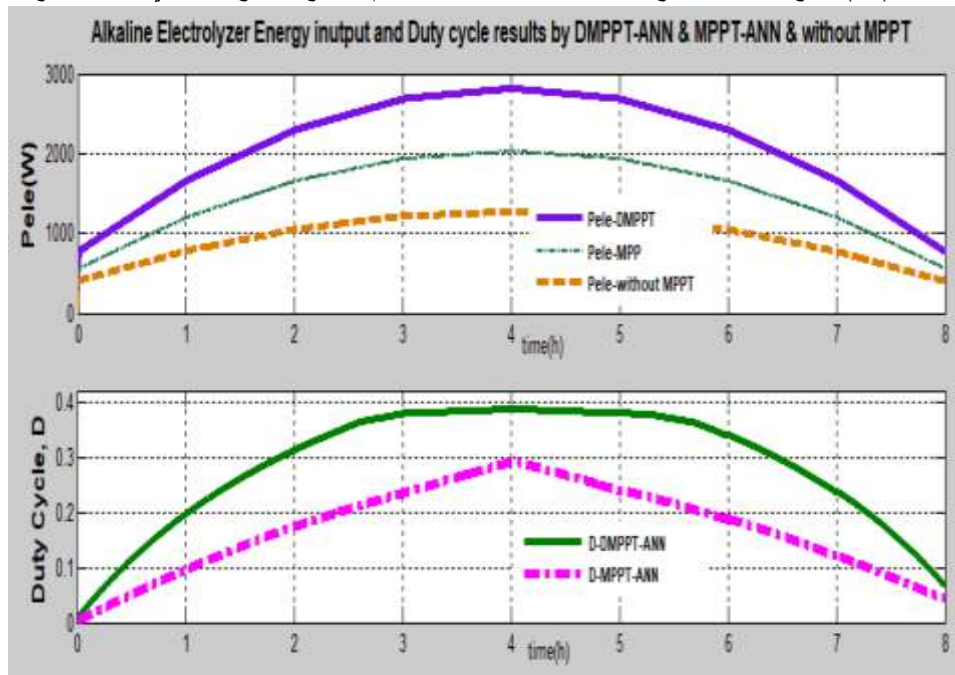
الشكل (11) نتائج توتر، تيار خرج نظام PV، الناتجة باستخدام المتتبع المقترح والمرجعي وبدون متتبع.



الشكل (12) نتائج الطاقة لخرج نظام PV، مع الكفاءة الناتجة باستخدام المتتبع المقترح والمرجعي وبدون متتبع.



الشكل (13) نتائج توتر، تيار خرج المحللة القلوية الناتجة باستخدام المتتبع المقترح وبدون متتبع.



الشكل (14) مقارنة نتائج الطاقة لخرج المحللة القلوية مع نسب التشغيل الناتجة باستخدام المتتبع المقترح والمرجعي.

تظهر نتائج المحاكاة الناتجة، سلوك نظام التحليل الكهروضوئي أثناء عملية تتبع نقطة MPP، حيث تزداد الطاقة المتولدة من نظام PV، والمنقولة للمحللة القلوية، مع ازدياد شدة الإشعاع الشمسي، وبالعكس تتناقص مع تناقصها. كما يلاحظ أن كفاءة نظام PV الناتجة تتقارب من الواحد في حال استخدام المتتبع المقترح، وهذا يظهر الأداء الجيد والفعال للمتتبع العصبوني المقترح في البحث، في زيادة في الطاقة المقدمة للمحللة القلوية.

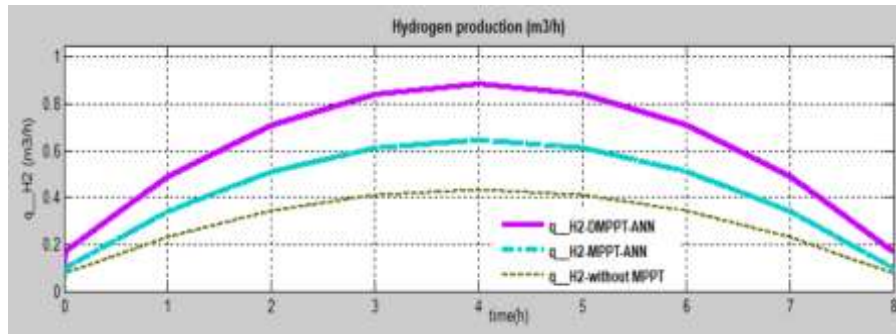
2-2 تقييم كفاءة إنتاجية المحللة القلوية خلال عملية التحليل الكهروضوئي

تعتمد تقييم كفاءة إنتاجية المحللة القلوية خلال عملية التحليل الكهروضوئي، على مقارنة نتائج كمية الهيدروجين المنتج، وتعتمد أيضا على مقارنة نتائج الطاقة الكهربائية المقدمة للمحللة والتي يمكن نقلها من نظام PV عن طريق مبدل الجهد إلى المحللة، لتحليل الماء وإنتاج كل من غاز الهيدروجين والأوكسجين.

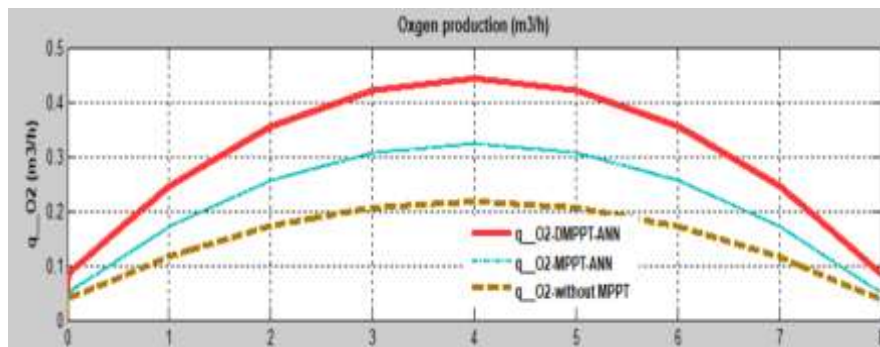
نعرض الآن نتائج التحليل الكهروضوئي للماء والمبينة في الأشكال (15)، (16)، (17)، (18) على التوالي، والتي تظهر نتائج كمية غاز الهيدروجين المنتج، كمية غاز الأوكسجين المنتج، وكمية الماء المستهلكة أثناء عملية التحليل الكهروضوئي، كذلك مردود فاراداي. ومنه يمكن ملاحظة زيادة إنتاجية المحللة للهيدروجين والأوكسجين مع ازدياد الطاقة المقدمة للمحللة. وكذلك يزداد مردود فاراداي. كما يظهر الجدول (1) نتائج أعظم كفاءة لنظام PV (eff_{pv} efficiency of Photovoltaic system) وكمية الهيدروجين المنتجة الناتجة عند أعظمى قيمة للإشعاع الشمسي خلال النهار أي عند الساعة 12 ظهرا. يلاحظ أن أفضل قيم لكفاءة نظام PV، هي الناتجة باستخدام المتتبع المقترح.

الجدول (1) أفضل كفاءة نظام PV، وكمية الهيدروجين المنتجة عند أعظمى قيمة للإشعاع الشمسي الموافقة للساعة 12 ظهرا .

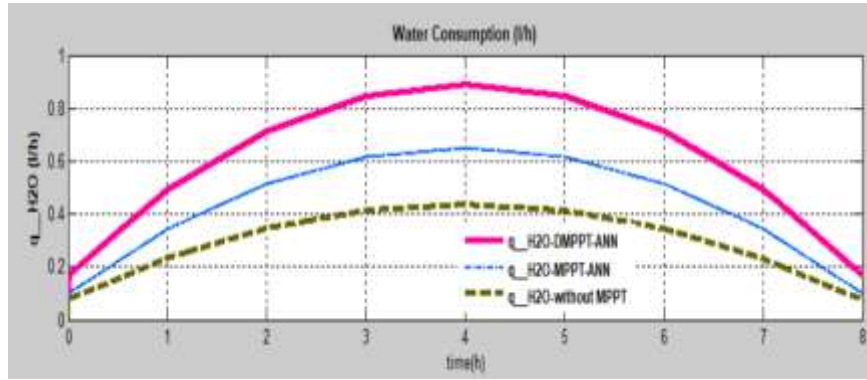
eff_{pv}, q_{H_2}	DMPPT-ANN	MPPT-ANN	Without-MPPT
eff_{pv}	0.9785	0.6665	0.3731
$q_{H_2} [m^3/h]$	0.8887	0.6482	0.4314



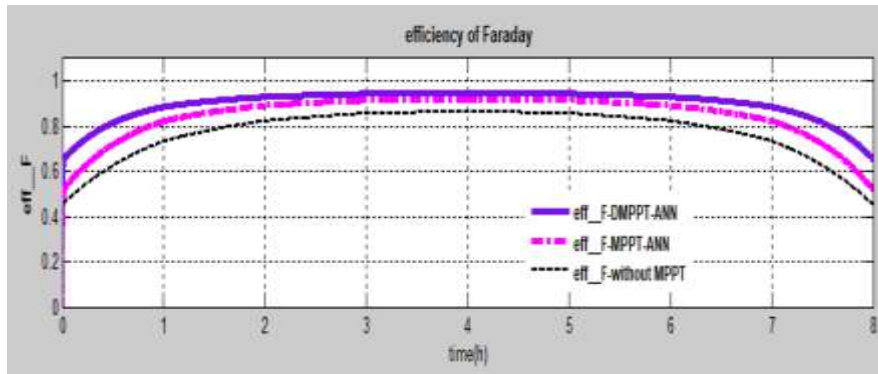
الشكل (15) نتائج كمية غاز الهيدروجين المنتج عند استخدام المتتبع المقترح والمرجعي وبدون متتبع.



الشكل (16) نتائج كمية غاز الأوكسجين المنتج عند استخدام المتتبع المقترح والمرجعي وبدون متتبع.



الشكل (17) نتائج كمية الماء المستهلك عند استخدام المتتبع المقترح والمرجعي وبدون متتبع.

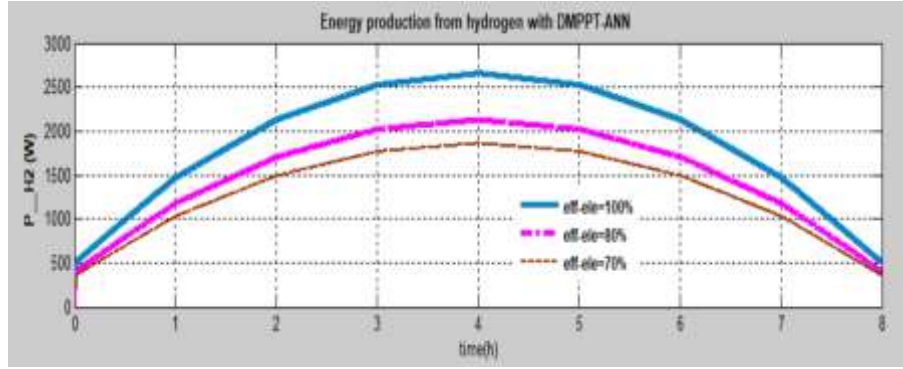


الشكل (18) نتائج كفاءة فاراداي عند استخدام المتتبع المقترح والمرجعي وبدون متتبع.

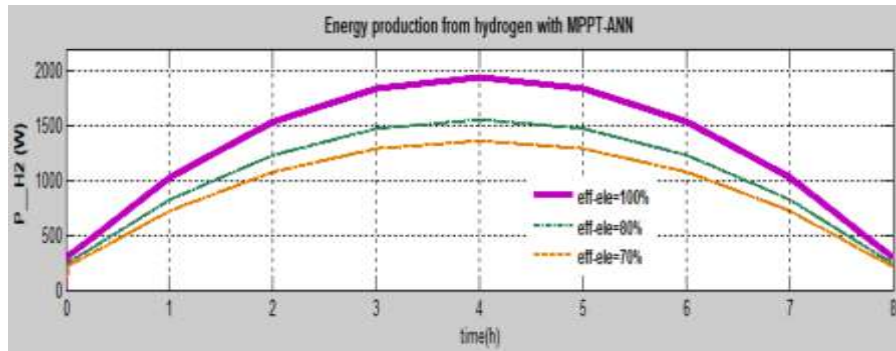
3-2 الطاقة الكهربائية المنتجة من الهيدروجين

تتراوح الكفاءة العملية للمحطة القلوية بين (70-80%)، وذلك نتيجة ضياعات الطاقة المرافقة لعملية إنتاج الهيدروجين أثناء عملية التحليل الكهربائي للماء. لذلك، يصرف جزء من الطاقة الكهربائية المقدمة للمحطة، كضياعات في الطاقة، ضياعات الحرارة المرافقة، وضياعات أخرى ناتجة عن هبوط الجهد في المقاومة الداخلية للمحطة. بينما يستفاد من الجزء الآخر من الطاقة الكهربائية المقدمة، في إنتاج الهيدروجين. تحدد الطاقة المنتجة من الهيدروجين، مع الفرضيات التالية لكفاءة المحطة القلوية (eff_{ele}) (efficiency of Electrolyzer):

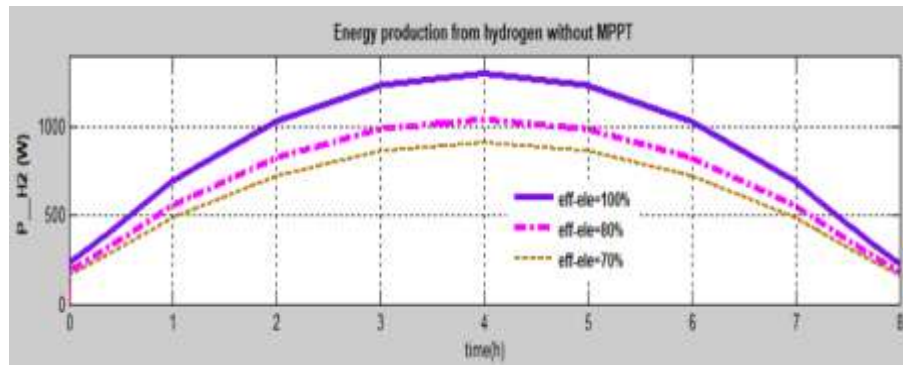
- كفاءة المحطة $eff_{ele} = 100\%$: بإهمال ضياعات الطاقة أثناء عملية التحليل الكهربائي للماء.
 - كفاءة المحطة $eff_{ele} = 80\%$: تشكل ضياعات الطاقة 20% من إجمال الطاقة المقدمة للمحطة.
 - كفاءة المحطة مقدارها $eff_{ele} = 70\%$: تشكل ضياعات الطاقة 30% من إجمال الطاقة المقدمة للمحطة.
- تظهر الأشكال (19)، (20)، (21) على التوالي، نتائج الطاقة المنتجة من الهيدروجين الناتج عن عملية التحليل الكهروضوئي، عند استخدام المتتبع المقترح والمرجعي وبدون متتبع، وذلك عند كفاءة مختلفة للمحطة القلوية: $eff_{ele} = (100 - 80 - 70)\%$. تظهر النتائج، بأن الطاقة المنتجة هي أكبر باستخدام المتتبع المقترح، مقارنة مع نتائج المتتبع المرجعي وحالة الاقتران المباشر.



الشكل (19) الطاقة المنتجة من الهيدروجين الناتجة باستخدام المتتبع المقترح عند كفاءة مختلفة للمحطة القلوية.



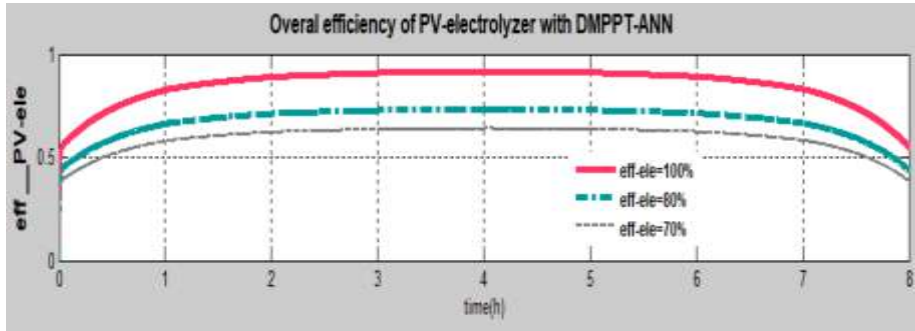
الشكل (20) الطاقة المنتجة من الهيدروجين الناتجة باستخدام المتتبع المرجعي عند كفاءة مختلفة للمحطة القلوية.



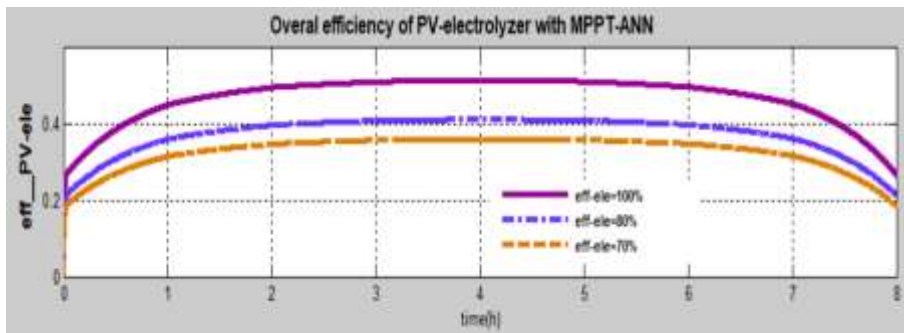
الشكل (21) الطاقة المنتجة من الهيدروجين الناتجة بدون استخدام متتبع عند كفاءة مختلفة للمحطة القلوية.

4-2 كفاءة نظام التحليل الكهروضوئي

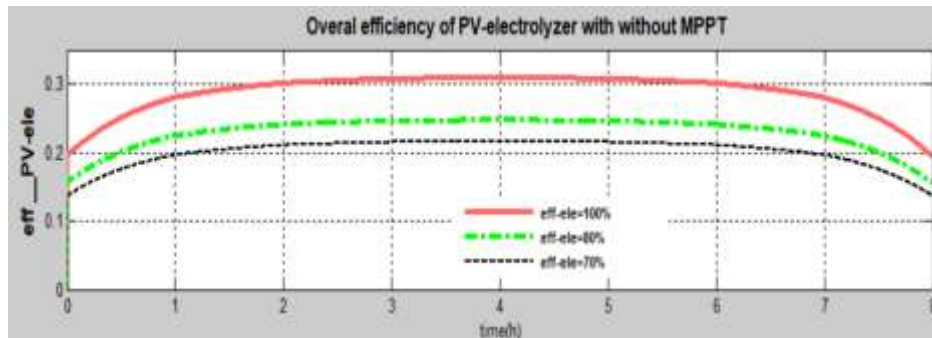
تحدد كفاءة نظام التحليل الكهروضوئي (eff_{pv-ete} efficiency of Photovoltaic-Electrolyzer) كنتاج قسمة الطاقة المنتجة من كمية الهيدروجين الناتجة عن عملية التحليل الكهربائي على الطاقة العظمى النظرية لنظام PV. تظهر الأشكال (22)، (23)، (24) على التوالي، نتائج كفاءة نظام التحليل الكهروضوئي، الناتجة باستخدام المتتبع العصبوني المقترح، والمتتبع المرجعي، وفي حالة الوصل المباشر، وذلك عند كفاءة مختلفة للمحطة القلوية: $eff_{ete} = (100 - 80 - 70)\%$. تظهر النتائج، بأن كفاءة نظام التحليل الكهروضوئي هي أفضل باستخدام المتتبع المقترح، مقارنة مع استخدام المتتبع المرجعي، ومقارنة مع حالة الاقتران المباشر.



الشكل (22) كفاءة نظام التحليل الكهروضوئي الناتجة باستخدام المتتبع المقترح عند كفاءة مختلفة للمحللة القلوية.



الشكل (23) كفاءة نظام التحليل الكهروضوئي الناتجة باستخدام المتتبع المرجعي عند كفاءة مختلفة للمحللة القلوية.



الشكل (24) كفاءة نظام التحليل الكهروضوئي الناتجة بدون استخدام متتبع عند كفاءة مختلفة للمحللة القلوية.

يظهر الجدول (2) كفاءة نظام التحليل الكهروضوئي eff_{pv-ele} ، الناتجة عند أعظمى قيمة للإشعاع الشمسي خلال النهار عند الساعة الموافقة 12 ظهرا. يلاحظ أن أفضل قيم للكفاءة ناتجة باستخدام المتتبع المقترح، يليه المتتبع العصبوني المرجعي، يليه حالة الاقتران المباشر.

الجدول (2) أفضل قيم لكفاءة نظام التحليل الكهروضوئي eff_{pv-ele} الناتجة عند كفاءة مختلفة للمحللة eff_{ele}

eff_{pv-ele}	DMPPT-ANN	MPPT-ANN	Without-MPPT
$eff_{pv-ele} (eff_{ele} = 100\%)$	0.9159	0.6682	0.4451
$eff_{pv-ele} (eff_{ele} = 80\%)$	0.7326	0.5343	0.3561
$eff_{pv-ele} (eff_{ele} = 70\%)$	0.6414	0.4675	0.3116

الاستنتاجات والتوصيات:

- تم في هذا البحث تحسين أداء نظام محطة ماء قلوبية-نظام كهروضوئي في حالة الاقتران غير المباشر باستخدام متتبع عصبوني وخوارزمية متغيرة الخطوة لتقدير نسبة التشغيل المستخدمة لضبط دورة عمل مبدل جهد مستمر في بيئة Matlab/Simulink. وبالتالي، يمكن تلخيص ما تم إنجازه والتوصل إليه بالنقاط التالية:
- ✓ تم استنتاج لنموذج الرياضي لتحديد تيار دائرة القصر للنظام PV، للاستفادة منه في الحصول على بيانات التدريب للنموذج العصبوني المقترح لتقدير قيم تيار القصر المستخدمة بالتالي لتحديد تيار التشغيل الأمثل لنظام PV. وبذلك، تم التغلب على مشكلة الفقد في الطاقة أثناء عملية قياس تيار دائرة القصر تجريبياً.
 - ✓ تم اقتراح خوارزمية متغيرة الخطوة لنسبة التشغيل، والتي ساهمت بشكل فعال في تحسين الأداء الديناميكي للمتتبع عند تتبع نقطة MPP.
 - ✓ حقق المتتبع العصبوني المقترح، رفع كفاءة نظام PV، مما مكن من تحسين وزيادة الطاقة الكهروضوئية المغذية للمحطة القلوبية، وبالتالي تحسين إنتاجية الهيدروجين الناتج عن عملية التحليل الكهروضوئي. وبالتالي، من تحسين كفاءة نظام التحليل الكهروضوئي.
 - ✓ أظهرت النتائج أن كفاءة نظم التحليل الكهروضوئي ذات الاقتران غير المباشر، تتعلق بكفاءة أداء المتتبع، وكذلك هي أفضل من حالة الاقتران المباشر بدون متتبع وبدون مبدل قدرة الكترونية.
 - ✓ يشكل الهيدروجين وسيط جيد لتخزين الطاقة الكهروضوئية، كما يمكن بسهولة استرجاع الطاقة المخزنة فيه باستخدام خلايا الوقود، أو باستخدام الهيدروجين كوقود بديل عن البنزين أو الديزل في المحركات ذات الاحتراق الداخلي.
 - ✓ نوصي بالاهتمام بدراسة استخدام نظم التحليل الكهروضوئي، وإنجاز مشاريع تنفيذية في سوريا، وذلك لتمتع بلدنا بمستويات لشدة الإشعاع الشمسي عالية على مدار السنة، مما يعزز من الاستفادة من استخدام الطاقة الكهروضوئية لإنتاج الهيدروجين بالاعتماد على استخدام مياه البحر أو مياه الآبار، وهذا يخفف بشكل كبير من تكلفة عملية التحليل الكهروضوئي ويسمح بإنتاج الهيدروجين الأخضر صديق البيئة.

References:

- [1] ZIANI, A.; ALSHANKITI, I.; KHAN, M.; IDRIS, H. *Integrated Photo-Electrocatalytic (PEC) Systems for Water Splitting to Hydrogen and Oxygen under Concentrated Sunlight: Effect of Internal Parameters on Performance*. Energy Fuels, 34, 2020, 13179–13185.
- [2] IDRIS, H. *Hydrogen production from water: past and present*. Current Opinion in Chemical Engineering 29, 2020, 74-82.
- [3] KHAN, M.; ALSHANKITI, I.; ZIANI, A.; IDRIS, H. *Demonstration of green hydrogen production using solar energy at 28% efficiency and evaluation of its economic viability*. Sustainable Energy Fuels, 2021, 1-10.
- [4] KHALILNEJAD, A.; ABASPOUR, A.; SARWA, A. I. *Multi-Level Optimization Approach for Directly Coupled 1 Photovoltaic–Electrolyser System*. International Journal of Hydrogen, 28, 2016, 11884–11894.
- [5] SHAHID, M.; MUHAMMAD, A.; MAHER, A.; MOHANNAD, A.; TAYIRJAN, T.; HICHAM, I. *Sixteen Percent Solar-to-Hydrogen Efficiency Using a Power-Matched Alkaline Electrolyzer and a High Concentrated Solar Cell: Effect of Operating Parameters*. American Chemical Society, 5, 2020, 10510–10518.

- [6] AOUALIA, Z.; BECHERIFB, M.; TABANJAT, A.; EMZIANEC, M.; MOHAMMEDIA, K.; KREHID, S.; KHELLAF, A. *Modelling and experimental analysis of a PEM electrolyser powered by a solar photovoltaic panel*. Energy Procedia 62, 2014, 714 – 722.
- [7] MUSTAFA, E. *A photovoltaic powered electrolysis converter system with maximum power point tracking control*. International Journal of Hydrogen Energy 45, 2020, 9293-9304.
- [8] ULLEBERG, Y. *Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach*. International Journal of Hydrogen Energy 28, 2003, 21-33.
- [9] HADEED, S.; ALI, F.; ABDULLAH, N.; KALED, A. *An intelligent control strategy of fractional short circuit current maximum power point tracking technique for photovoltaic applications*. Journal of Renewable Sustainable Energy 7, 2015, 1-15.
- [10] A. NADEEM, A.; HADEED, S.; NISAR, A. *Online current-sensorless estimator for PV open circuit voltage and short circuit current*. Solar Energy 213, 2021, Pages 198-210.
- [11] MOSTEFA, K.; MADJID, B. *Artificial intelligence-based maximum power point tracking controllers for Photovoltaic systems: Comparative study*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 69, 2017, 369–386.
- [12] REVATHY1, S.; KIRUBAKARAN, V. *A Critical review artificial neural network based maximum power point tracking technique*. Journal of Critical Reviews 7, 2020, 400-412.