

# Evaluation the Effect of Connecting the Photovoltaic Systems on the Reliability of the Host Power Distribution Systems Using an Adaptive Monte Carlo Simulation

Dr. Ammar Adnan Hajjar<sup>\*</sup>

Dr. Shoeeb Mahmoud<sup>\*\*</sup>

George Hanna Bosalameh<sup>\*\*\*</sup>

(Received 23 / 5 / 2019. Accepted 8 / 8 / 2019)

## □ ABSTRACT □

Traditional power systems face many challenges. Such as, the increasing demand for electricity, Potential for fossil fuel depletion, Emissions of greenhouse gases from generation plants. In addition to the difficulty of building new electrical networks technically, economically and environmentally. Therefore, electric power foundations have tended to generate electricity from new and renewable sources of energy because they are free, sustainable and environmentally friendly.

The Photovoltaic systems (PVS) are the most important power generators that can be connected to electricity networks. However, the use of photovoltaic systems may affect the reliability of electrical distribution systems due to the intermittent nature of solar radiation. So it is important to study the effect of connecting/disconnecting photovoltaic systems on the reliability of host electrical distribution systems.

In order to study the effect of connecting/disconnecting the PVS on the reliability of host electrical distribution systems, the adaptive and non-adaptive Monte Carlo Simulation methods have been applied to the RBTS Bus 2. The statistical results were compared using the MATLAB software environment, where a random model was used to simulate the randomization in the generation from the PV systems. The results of this study showed the efficiency and superiority of the Adaptive Monte Carlo simulation method in evaluating the reliability of the distribution systems hosting the PV systems. Moreover, the PV systems have contributed in improving the reliability of the host network.

**Keywords:** PV System, Reliability of distribution systems, Adaptive Monte Carlo Simulation.

---

<sup>\*</sup>Professor. Electrical Engineering Dept. - Faculty of Mechanical and Electrical engineering -Tishreen University - Lattakia - Syria. *E-mail:* [ammarhajjar@hotmail.com](mailto:ammarhajjar@hotmail.com) / [ammarhajjar@tishreen.edu.sy](mailto:ammarhajjar@tishreen.edu.sy)

<sup>\*\*</sup>Professor. Electrical Engineering Dept. - Faculty of Mechanical and Electrical engineering -Tishreen University - Lattakia - Syria.

<sup>\*\*\*</sup>Master of Renewable Energies Engineering and Environment, Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen Univ. *E-mail :* [george.bo.salameh@tishreen.edu.sy](mailto:george.bo.salameh@tishreen.edu.sy) / [georgebosalameh@gmail.com](mailto:georgebosalameh@gmail.com)

## تقييم تأثير ربط أنظمة الخلايا الكهروضوئية على موثوقية أنظمة التوزيع الكهربائية المضيفة باستخدام محاكاة مونت كارلو المتكيفة

د. عمّار عدنان حجّار\*

د. شعيب محمود\*\*

جورج حنا بو سلامة\*\*\*

(تاريخ الإيداع 23 / 5 / 2019. قَبْلُ للنشر في 8 / 8 / 2019)

### □ ملخّص □

تواجه أنظمة الطاقة الكهربائية التقليدية العديد من التحديات، مثل زيادة الطلب على الطاقة الكهربائية، احتمال نفاذ الوقود الأحفوري، انبعاث الغازات الملوثة للبيئة من محطات التوليد، بالإضافة إلى صعوبة بناء شبكات كهربائية جديدة من الناحية الفنية والاقتصادية والبيئية. لذا، اتجهت مؤسسات الطاقة الكهربائية نحو توليد الطاقة الكهربائية من مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة كونها مجانية، مستدامة، وصديقة للبيئة.

تعتبر أنظمة الخلايا الكهروضوئية (PVS: Photovoltaic Systems) من أهم مولدات الطاقة الكهربائية التي يمكن رفد الشبكات الكهربائية بها، لكن قد يؤثر هذا العمل على موثوقية أنظمة التوزيع الكهربائية بسبب الطبيعة المتقطعة للإشعاع الشمسي. لذلك، لا بد من دراسة تأثير ربط/عزل أنظمة الخلايا الكهروضوئية على موثوقية أنظمة التوزيع الكهربائية المضيفة.

لدراسة تأثير ربط/عزل أنظمة الخلايا الكهروضوئية (PVS) على موثوقية أنظمة التوزيع الكهربائية المضيفة تم في هذا البحث تطبيق كل من طريقتي محاكاة مونت كارلو غير المتكيفة والمتكيفة على شبكة توزيع كهربائية اختبارية RBTS Bus 2، وتم مقارنة النتائج الإحصائية لكل منهما وذلك باستخدام بيئة MATLAB البرمجية، حيث تم استخدام نموذج عشوائي لمحاكاة العشوائية في توليد الطاقة الكهربائية من أنظمة PV. لقد بينت نتائج الدراسة كفاءة ونفوق طريقة محاكاة مونت كارلو المتكيفة في تقييم موثوقية أنظمة التوزيع المضيفة لأنظمة PV، كما بينت أنّ أنظمة PV تساهم في تحسين موثوقية الشبكة المضيفة.

**الكلمات مفتاحية:** أنظمة الخلايا الكهروضوئية، موثوقية أنظمة التوزيع الكهربائية، محاكاة مونت كارلو التكيفية.

\* أستاذ دكتور في قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

بريد الكتروني: [ammarhajjar@tishreen.edu.sy](mailto:ammarhajjar@tishreen.edu.sy) / [ammarhajjar@hotmail.com](mailto:ammarhajjar@hotmail.com)

\*\* أستاذ دكتور في قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

\*\*\* طالب ماجستير في هندسة الطاقات المتجددة والبيئة، قسم الطاقة الكهربائية، كلية الهيك - جامعة تشرين - سورية.

بريد الكتروني: [george.bo.salameh@tishreen.edu.sy](mailto:george.bo.salameh@tishreen.edu.sy) / [georgebosalameh@gmail.com](mailto:georgebosalameh@gmail.com)

**مقدمة:**

ازداد في السنوات الأخيرة الاهتمام في استخدام المولدات الموزعة (DG: Distributed Generation) لأجل تحسين موثوقية أنظمة القدرة الكهربائية [1، 2]. لقد انصب الاهتمام على استخدام مصادر الطاقة المتجددة لأجل توليد الكهرباء كونها طاقة مجانية، نظيفة، ومستدامة.

تتخذ مصادر الطاقة المتجددة أشكالاً مختلفة، مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية. لقد قام العديد من الباحثين بدراسة أثر ربط المولدات الكهروضوئية على شبكات التوزيع الكهربائية المضيفة، وذلك نظراً لأن خرج الخلايا الكهروضوئية (PV) متغير بطبيعته، ولأنه يجب أن يكون لشبكات التوزيع الكهربائية القدرة الكافية للتعامل مع الانخفاض المفاجئ في الطاقة المولدة من الخلايا الكهروضوئية، كما أنه يجب أن تكون هذه الشبكات قادرة على التعامل مع سريان الاستطاعة ثنائي الاتجاه، وذلك لأن المولدات الموزعة توضع عادةً بالقرب من المستهلك، الذي يتطلب من شركات الكهرباء ترقية أنظمة الحماية الخاصة بها للتعامل مع أنماط التشغيل المختلفة [3].

في هذا السياق، قام باحثون في المرجع [4] بدراسة أثر المولدات الموزعة وأنظمة تخزين الطاقة الكهربائية على موثوقية أنظمة التوزيع الكهربائية، وذلك من خلال استخدام نموذج لنظام التخزين يتعامل مع التقلبات في إنتاج الطاقة من مصادر الطاقة المتجددة. لتقييم موثوقية شبكات التوزيع التي تحتوي على مولدات كهروضوئية (PV)، قام باحثون في المرجع [5] ببناء نموذج عشوائي للتعامل مع مسألة عدم اليقين في التوليد من هذه المصادر، كما وضّحوا نموذج الخرج للخلايا الكهروضوئية.

اقترح باحثان في المرجع [6] ثلاثة توزيعات احتمالية لتقطع الإشعاع الشمسي وهي: التوزيع العادي، توزيع ويبل، وتوزيع بيتا، ثم قارنا النتائج التي حصلنا عليها في مواسم مختلفة بتطبيق هذه التوزيعات، ثم أوصيا باستخدام توزيع بيتا و توزيع ويبل لتمثيل النقط في الإشعاعات الشمسية حسب الزمن المطلوب. قام باحثون في المرجع [7] بوضع نموذج احتمالي يمثل التباين في إنتاج الطاقة الكهروضوئية، حيث قاموا بجمع بيانات الأرصاد الجوية وقارنوها مع النتائج التي تم الحصول عليها من النموذج الذي أثبت أن التباين في إنتاج الطاقة يخضع للتوزيع الطبيعي.

بما أن حالات الفشل في شبكات التوزيع تمثل حوالي 80% من متوسط حالات انقطاع التغذية الكهربائية عن المستهلكين، فإن تعزيز موثوقية نظام التوزيع الكهربائي من خلال تقليل معدل حالات الفشل المتوقعة ووقت انقطاع التغذية، دفع باحثون إلى تقييم موثوقية أنظمة التوزيع المضيفة للمناخ المتقطعة في التوليد، من خلال استخدام طرق المحاكاة والتحليل لتقييم مؤشرات الموثوقية لتلك الأنظمة [8]. إذاً، هناك أسلوبان رئيسيان من تقنيات تقييم الموثوقية، الأسلوب الأول هو الأسلوب التحليلي [9] الذي يتطلب سلسلة من العمليات الحسابية مع تقريب النتائج عند ازدياد تعقيد النظام المدروس، و الأسلوب الثاني هو أسلوب التمثيل العشوائي، الذي يعتمد على تمثيل حالات عدم اليقين المرتبطة بالنظام المدروس باستخدام نظرية السلاسل الزمنية، ويعتبر هذا الأسلوب الأنسب، تتبع طريقة محاكاة مونت كارلو (MCS: Monte Carlo Simulation) هذا الأسلوب [10]. بالرغم من أنه للتمثيل العشوائي تكلفة حسابية عالية، إلا أنه قادر على التعرف على الترابط التسلسلي في حالات عدم اليقين من النظام، ويعتبر أحد أفضل الطرق المستخدمة لتقييم المؤشرات المرتبطة بالمدة التراكمية لحدث ما خلال فترة الدراسة [11].

يعد تقييم موثوقية نظام التوزيع بالاعتماد على محاكاة مونت كارلو مفيد جداً للأنظمة غير الخطية المعقدة، بالإضافة إلى ذلك تعطي محاكاة مونت كارلو مزيداً من المعلومات حول نقاط الحمولة ومؤشرات الموثوقية للنظام مقارنة بالطرق

التحليلية. لكن، تعتمد محاكاة مونت كارلو على عدد كبير من التجارب، يتم تحديده مسبقاً، للحصول على نتائج موثوقة بها، إلا أن الاختيار المسبق لعدد التجارب لن يعطي السيطرة الكاملة على العملية [12]. غالباً، تعتبر القيمة ( $10^6$ ) لعدد التجارب مناسبة من أجل توفير فترة تغطية 95% من كمية النتائج. بالإضافة إلى ذلك، يكون للطبيعة العشوائية للعملية ولطبيعة التوزيع الاحتمالي لكمية الخرج Y تأثير على القيمة المطلوبة لعدد التجارب [12]. لهذا، يجب تنفيذ MCS بطريقة تكيفية بحيث يزداد عدد التجارب تدريجياً حتى تستقر النتائج.

لذا، تم في هذا البحث استخدام محاكاة مونت كارلو المتكيفة (AMCS: Adaptive Monte Carlo Simulation) لتقييم تأثير ربط أنظمة الخلايا الكهروضوئية على موثوقية شبكات التوزيع الكهربائية المضيفة، مع الأخذ في الحسبان سلوك النظام العشوائي الناتج عن تقلبات الحمل والإشعاع الشمسي، وذلك بعد تحديد الحجم والمكان المناسبين لأنظمة الخلايا الكهروضوئية. لقد تم في هذا البحث، تطبيق كل من الطريقتين AMCS وMCS على نظام اختباري RBTS Bus2، ومن ثم تم مقارنة النتائج الإحصائية التي تم الحصول عليها لكل منهما، وذلك في حالة وجود/عدم وجود أنظمة الخلايا الكهروضوئية. لقد أظهرت النتائج فعالية وتفوق AMCS على MCS، كما أظهرت أثر أنظمة الخلايا الكهروضوئية في تحسين موثوقية شبكات التوزيع الكهربائية المضيفة.

## أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية هذا البحث من ضرورة تقييم موثوقية شبكات التوزيع الكهربائية المضيفة لمصادر الطاقات المتجددة (أنظمة الخلايا الكهروضوئية) ذات التوليد المتقطع، وذلك في مرحلتي التخطيط والتشغيل، بهدف الاستثمار الأمثل لهذه الشبكات.

### 1- صياغة المشكلة:

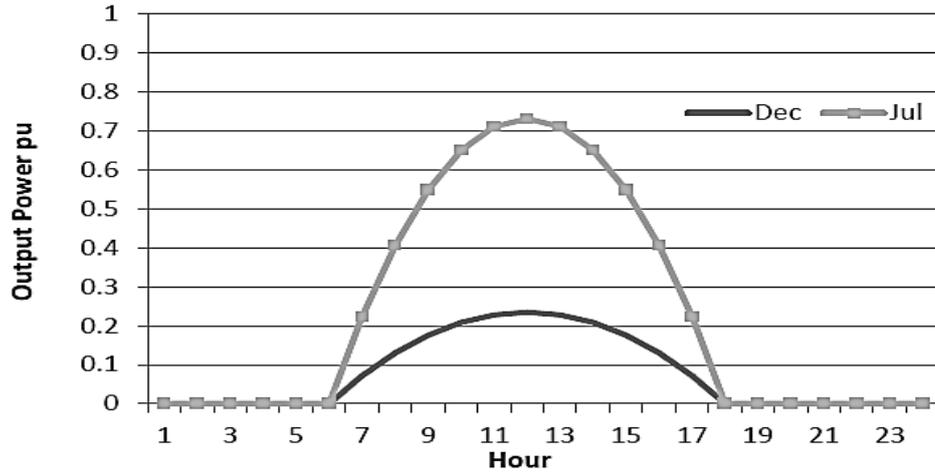
#### 1-1- النموذج الرياضي لخرج الخلايا الكهروضوئية:

بما أن الإشعاع الشمسي متقطع بطبيعته فإن خرج الخلايا الكهروضوئية (PV) من الاستطاعة ليس دائماً، وهذا يبرز الحاجة إلى إيجاد نموذج عشوائي لمحاكاة خرج الخلايا الكهروضوئية (PV) من الاستطاعة، النموذج العشوائي هو تقنية تعتمد على المحاكاة لوصف السلوك العشوائي للنظام.

تؤثر شدة الإشعاع الشمسي  $I(t)$  ومساحة سطح الألواح الشمسية (S) بشكل كبير على قيمة خرج الخلايا الكهروضوئية (الاستطاعة الكهربائية)، حيث تختلف شدة الإشعاع الشمسي من وقت لآخر ومن شهر لآخر، وقد تصل إلى الذروة خلال فصل الصيف، أنظر إلى الشكل (1). تعطى استطاعة الخرج الساعية للخلايا الكهروضوئية بالمعادلة (1) [14].

$$P(\text{out}) = \begin{cases} \frac{\mu_C}{k} * S * I(t)^2 & 0 < I(t) \leq K \\ \mu_C * S * I(t) & I(t) > K \end{cases} \quad (1)$$

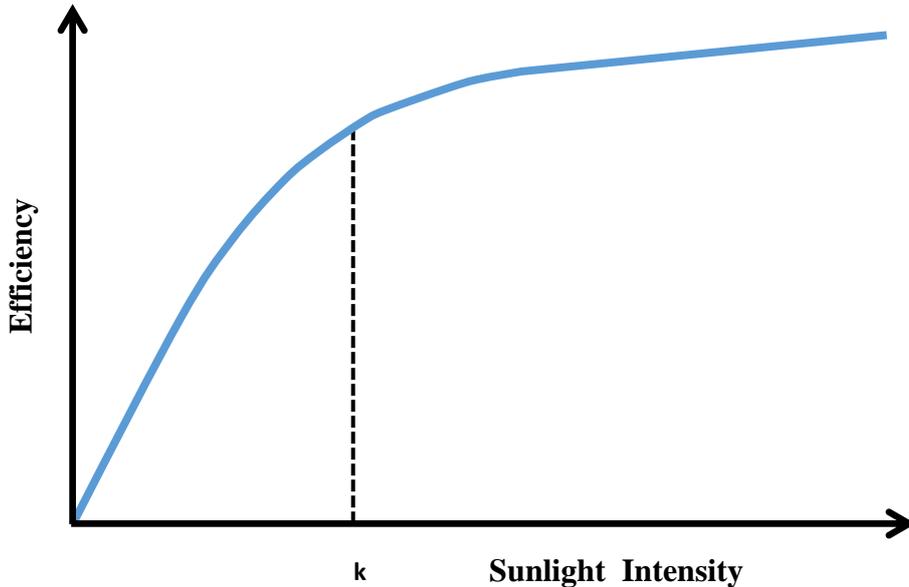
حيث تمثل  $\mu_C$  كفاءة الخلايا الكهروضوئية، وتمثل K عتبة شدة الإشعاع الشمسي. عندما تكون شدة الإشعاع الشمسي  $I(t)$  أصغر أو تساوي K لا تكون قيمة  $\mu_C$  ثابتة، لكن عندما تتجاوز شدة الإشعاع الشمسي  $I(t)$  العتبة K تصبح كفاءة الخلايا الكهروضوئية  $\mu_C$  ثابتة غالباً.



الشكل (1) استطاعة الخرج الساعية للخلايا الكهروضوئية في الصيف والشتاء [14].

يبين الشكل (2) العلاقة بين  $I(t)$  و  $\mu_C$ . حيث تعرّف شدة الإشعاع الشمسي  $I(t)$  بأنها كمية الإشعاع الشمسي الساقط على سطح الكرة الأرضية، الذي يختلف من مكان إلى آخر تبعاً لخطوط الطول والعرض، أما كفاءة الخلايا الكهروضوئية  $\mu_C$  هي نسبة الطاقة الناتجة من الخلايا الكهروضوئية إلى طاقة الإشعاع الشمسي الساقط على سطح الخلية الكهروضوئية. بفرض أن  $t$  هو الزمن بالساعة خلال اليوم الواحد، يُعبّر عن شدة الإشعاع الشمسي  $I(t)$  بالمعادلة (2) [15]:

$$I(t) = \begin{cases} I_{\max} \left( -\frac{1}{36}t^2 + \frac{3}{2}t - 3 \right) & 6 \leq t \leq 18 \\ 0 & 0 \leq t \leq 6 \text{ and } 18 < t \leq 24 \end{cases} \quad (2)$$



الشكل (2) العلاقة بين كفاءة الخلايا الكهروضوئية وشدة الإشعاع الشمسي [17].

يمكن أن تتأثر شدة الإشعاع الشمسي بعدة عوامل مثل، الغيوم، درجة الحرارة، والرطوبة النسبية. لجعل النموذج الكهروضوئي أكثر واقعية تم تنفيذ أداة التنبؤ بخرج الاستطاعة من الخلايا الكهروضوئية  $\Delta P_{out}$  اعتماداً على التوزيع الطبيعي [16]. يمكن التعبير عن استطاعة الخرج  $\Delta P_{out}$  بالمعادلة (3):

$$f(\Delta P_{out}) = \frac{1}{\sqrt{2 * \pi}} * \exp \left( -\frac{\Delta P_{out}^2}{2 * \sigma_{pv}^2} \right) \quad (3)$$

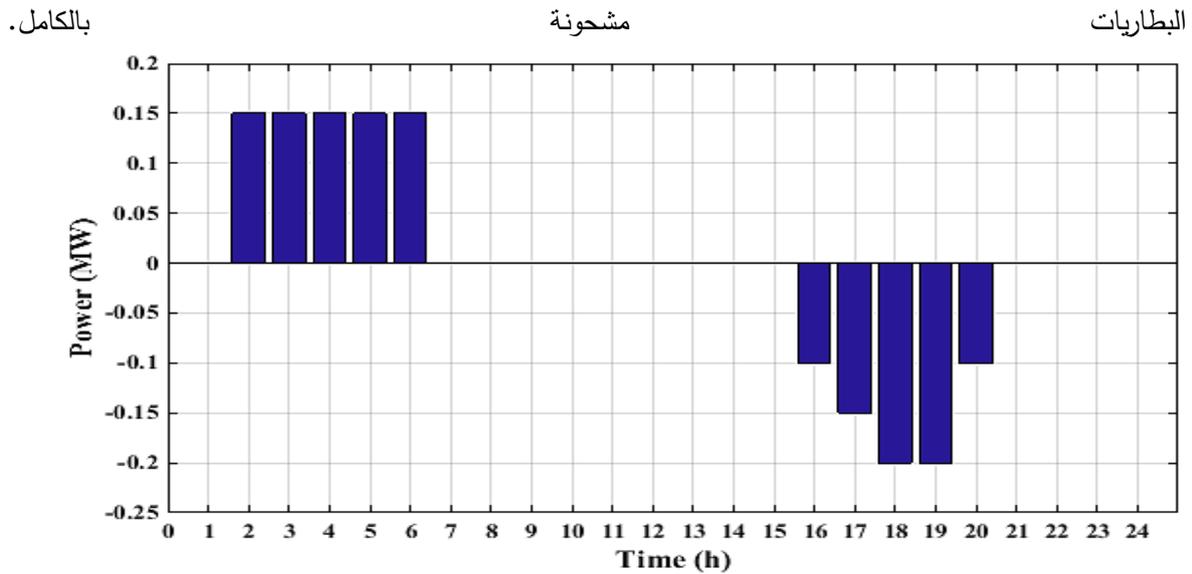
$\sigma_{pv}$  تعبر عن التباين في خرج الخلايا الكهروضوئية.

يعطى خرج الخلايا الكهروضوئية بالمعادلة (4) وهو يمثل خرج الخلايا الكهروضوئية في يوم مشمس  $P_{out}$  مضافاً إليه  $\Delta P_{out}$  (الارتياح) [16]:

$$P_{pv} = P_{out} + \Delta P_{out} \quad (4)$$

### 1-2- نظام تخزين الطاقة الكهربائية (البطاريات):

من السمات المميزة لاستخدام أجهزة تخزين الطاقة الكهربائية هي قدرتها على دعم الشبكة الكهربائية بالطاقة الكهربائية خلال وقت الذروة للحمولة، بالإضافة إلى جعل مصادر الطاقة المتجددة، التي لا يمكن التحكم في إنتاجها من قبل مشغلي الشبكات، مناسبة ومتاحة في جميع الأوقات. هناك العديد من التقنيات المستخدمة لتخزين الطاقة الكهربائية منها: المكثفات فائقة السعة، البطاريات الكهروكيميائية، الملفات المغناطيسية فائقة السعة... الخ. لقد تم في هذا البحث استخدام البطاريات الكهروكيميائية كنظام تخزين للطاقة الكهربائية، وذلك لمعالجة مشكلة تقلبات الخرج لأنظمة الخلايا الكهروضوئية ولتلبية الطلب الزائد على الحمولة عند ذروة التحويل. لقد تم استخدام بطاريات ذات استطاعة MWh 0.75 وقابلات ذات استطاعة MWh 0.3 [14]. يوضح الشكل (3) طريقة الشحن والتفريغ الساعي للبطاريات، حيث يتم شحن البطاريات خارج أوقات الذروة من الساعة 2 إلى الساعة 6 صباحاً، ويستهلك التخزين MWh 0.15 (على أساس معطيات الحمولة)، ويتم تفريغ البطاريات من الساعة 4 عصراً حتى الساعة 8 مساءً، وذلك لتغذية الحمولة خلال وقت الذروة نظراً لعدم وجود طاقة مستخرجة من الخلايا الكهروضوئية خلال هذا الوقت. في حال عجز الشبكة العامة عن تغذية الحمولة فإن الحمولة تستهلك ما يقارب MWh 0.3 من الطاقة خلال 2.5 ساعة إذا كانت



الشكل (3) الشحن والتفريغ الساعي لنظام التخزين (البطاريات) خلال 24 ساعة.

### 1-3- نموذج الحمولة:

تؤثر حالة الطقس والأحداث الموسمية على الحمل، حيث تقع معظم هذه الأحداث سنوياً في نفس الوقت تقريباً، لذلك يكون لسلوك أحمال نظام القدرة الكهربائي نمط متكرر خلال الظروف العادية، وبالتالي يمكن تطوير نموذج حمولة متفاوت زمنياً باستخدام البيانات المتعلقة بالزمن. تستخدم بيانات عامل الوزن الشهري والساعي لبناء نموذج الحمل. يبين الشكلان (4 ، 5) عوامل الوزن الشهرية والساعية للأحمال [14].

تستخدم المعادلة (5) للحصول على حمل الذروة المتوقع لنقطة الحمولة (i) في أي وقت مطلوب.

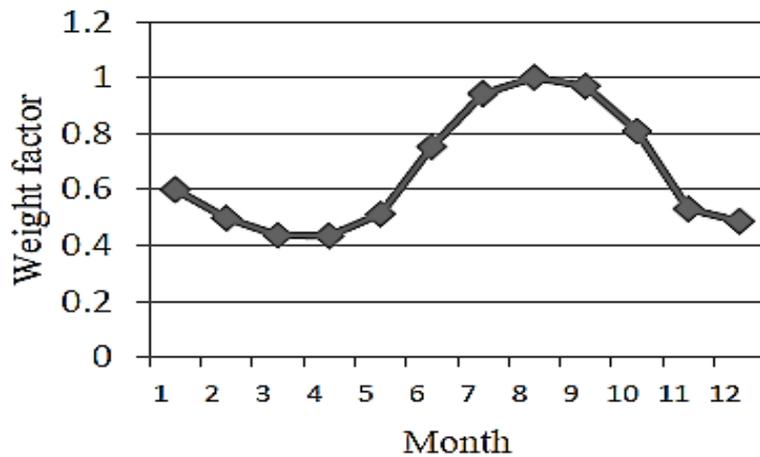
$$P_i(t) = W_h(h) \times W_m(m) \times P_{Li} \quad (5)$$

حيث:

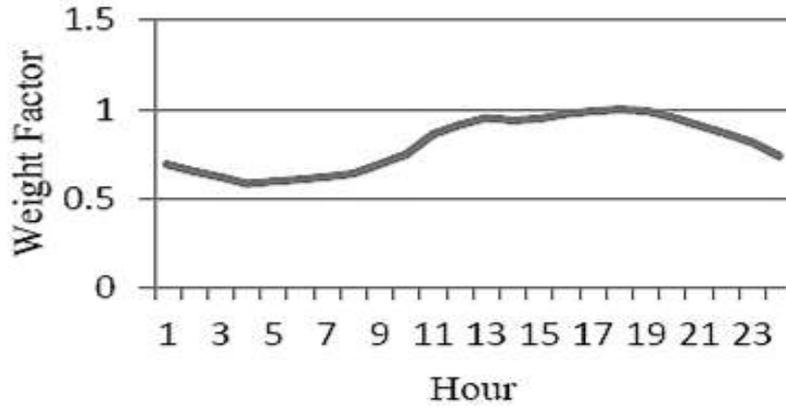
$W_h(h)$ : عامل الوزن الساعي.

$W_m(m)$ : عامل الوزن الشهري.

$P_{Li}$ : حمولة الذروة لنقطة الحمولة i.



الشكل (4) عوامل الوزن الشهري للحمل [14].



الشكل (5) عوامل الوزن الساعي للحمل [14].

## 2- مؤشرات موثوقية النظام:

تُعرّف الموثوقية بشكل عام بأنها قدرة النظام أو الآلة على إتمام المهمة المطلوبة منها في وقت معين. وتعتبر دراسة الموثوقية مهمة جداً في المجال الهندسي لأنها تساعد على تحسين عمل الأنظمة والآلات عبر تقليل معدل فشلها. إن مفهوم موثوقية الشبكات الكهربائية المرتبط بضمان العمل المستمر للنظام الكهربائي يفرض على مستثمري الشبكات الكهربائية خفض احتمال انقطاع التغذية الكهربائية عن المستهلك ورفع موثوقية النظام المُستثمر عبر استخدام عدة طرق، نذكر منها:

1- تحسين مستوى البنية التصميمية للنظام الكهربائي.

2- تحسين طرق التشغيل والتحكم في النظام الكهربائي.

3- إضافة مصادر الطاقة المتجددة أو نظم التخزين (أو كليهما) إلى النظام.

يمكن دراسة الانقطاعات وخروج العناصر من الخدمة بالاعتماد على شكل النظام وبيانات موثوقية العناصر باستخدام مؤشرات الموثوقية، وهي أدوات لتقويم الأداء السابق للنظام وتوقع الأداء المستقبلي له.

### 2-1 متوسط معدل الفشل ( $\lambda$ ):

يعرف على انه احتمال حدوث الفشل لنقطة الحموله خلال فترة محددة [18].

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (6)$$

حيث  $\lambda_i$  تمثل معدل الفشل في سلسلة المكونات من نقطة التغذية حتى نقطة الحموله.

### 2-2 متوسط مدة الانقطاع (U):

يُعرّف على أنه متوسط زمن انقطاع التغذية عن نقطة التحميل خلال فترة محددة [18].

$$U = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot r_i \quad (7)$$

حيث  $r_i$  تمثل متوسط وقت الاستعادة لمكونات الشبكة  $i$ .

### 2-3 مؤشر القيمة الوسطية لتكرار انقطاع تغذية النظام عن المستهلك (SAIFI):

(SAIFI: System Average Interruption Frequency Index)

يدلُّ هذا المؤشر على العدد الوسطي للانقطاعات الطويلة التي يواجهها كل مستهلك مشترك في النظام الكهربائي في منطقة محددة وفي زمن محدد [18]، والتي يمكن حسابها باستخدام المعادلة (8):

$$SAIFI = \frac{\sum N_i}{N_t} \quad (8)$$

حيث يمثل  $\sum N_i$  العدد الكلي لانقطاعات المستهلك، ويمثل  $N_t$  العدد الكلي للمستهلكين المرتبطين بالمنطقة المدروسة.

**2-4 مؤشر القيمة الوسطية لزمن استمرار انقطاع تغذية النظام (SAIDI):**

(SAIDI: System Average Interruption Duration Index)

يدلُّ هذا المؤشر على القيمة الوسطية لزمن استمرار انقطاع تغذية النظام عن كل مستهلك مشترك في النظام الكهربائي في المنطقة المدروسة خلال فترة زمنية محددة [18].

$$SAIDI = \frac{\sum r_i N_i}{N_t} \quad (9)$$

حيث تمثل  $\sum r_i N_i$  مدة انقطاعات التغذية الكلية عن المستهلك.

**2-5 القيمة المتوقعة للطاقة غير المقدمة للنظام: (EENS: Expected Energy Not Supplied)**

وهو إجمالي انقطاع الطاقة الكهربائية الذي سيواجه العملاء في سنة واحدة [18]. ويعطى بالمعادلة (10).

$$EENS = \sum E_i N_i \quad (10)$$

### 3- مقارنة بين محاكاة مونت كارلو (MCS) ومحاكاة مونت كارلو المتكيفة (AMCS)

يعود الفضل في ظهور طريقة محاكاة مونت كارلو واستخدامها بشكل منهجي إلى مشروع مانهاتن الذي أسسته الولايات المتحدة الأمريكية خلال الحرب العالمية الثانية من أجل تطوير أسلحة نووية. حيث اقترح جون فون نيومان وستانسلاف أولام التحقيق في خصائص السفر النيوتروني خلال عملية التدرج الإشعاعي [19]، وسمي هذا الأسلوب نسبة إلى كازينو مونت كارلو في موناكو.

تعتمد هذه الطريقة على أخذ عينات من القيم المحتملة لمتغيرات الدخل العشوائي وفقاً لتوزيعاتها  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . بعد ذلك يتم حساب قيم الخرج المتغير (Y) من خلال تابع الأداء أو ما يسمى بتابع الهدف  $Y = g(X)$  وذلك عند عينات متغيرات الدخل العشوائية. ونتيجة للعدد الكبير من التجارب التي أجريت بهذه الطريقة يكون لدينا مجموعة من عينات الناتج المتغيرة (Y) المتوفرة للتحليل الإحصائي الذي يقوم بتقدير خصائص تغيرات الخرج (Y) [12].

تعتمد محاكاة مونت كارلو على اختيار عدد التجارب مسبقاً، أي عدد عمليات تقييم النموذج التي سيتم إجراؤها، وفي هذه الحالة لن تكون هناك سيطرة مباشرة على جودة النتائج العددية التي تقدمها MCS [20]، والسبب في ذلك هو أن عدد التجارب اللازم لتزويد هذه النتائج بالتسامح العددي المحدد سيعتمد على: شكل تابع التوزيع الاحتمالي (PDF: Probability distribution function) لكمية المخرجات، واحتمال التغطية المطلوبة، إضافة إلى أن الطبيعة العشوائية للحسابات تعتمد على عينات عشوائية [20].

في كثير من الأحيان تعتبر قيمة  $10^6$  مناسبة لعدد التجارب التي تقدم فترة تغطية 95% من كمية النتائج، ونظراً لعدم وجود ضمان بأن هذا العدد أو أي عدد معين مسبقاً يكفي يمكن استخدام الإجراء الذي يختار عدد التجارب بشكل تكيفي، أي مع زياد عدد التجارب تدريجياً حتى يتم استقرار النتائج [20]، وباعتبار أن عدد التجارب في محاكاة مونت

كارلو معلمة أساسية من أجل الحصول على نتائج موثوق بها فان اختيار عدد التجارب مسبقاً سيؤدي إلى عدم السيطرة على النتائج، وهذا ما دفع إلى استخدام محاكاة مونت كارلو المتكيفة (AMCS: Adaptive Monte Carlo Simulation) التي تقوم على الجمع بين طريقتين أساسيتين هما:

1- دليل التعبير عن عدم اليقين في القياس.

(GUM: Guide to the expression of Uncertainty in Measurement)

2- طريقة محاكاة مونت كارلو (MCS).

حيث أن إطار عدم اليقين (GUF: GUM Uncertainty Framework) هو طريقة حتمية تستند إلى الجمع الرياضي لتوزيع الاحتمالات (بواسطة قانون نشر عدم اليقين ونظرية الحد المركزي). يعتمد GUF على قانون نشر عدم اليقين وعلى توصيف الكميات المقاسة بواسطة إما التوزيع الطبيعي (الغوسي) أو التوزيع  $t$  [20]، الذي يسمح بتحديد عدم اليقين في القياس من خلال فاصل الثقة [20]، في حين أن محاكاة مونت كارلو هي طريقة احتمالية تقوم بتنفيذ مجموعة من التوزيعات الاحتمالية بواسطة محاكاة عددية (من خلال أنظمة حساب لتوليد أعداد عشوائية).

يتضمن التنفيذ الأساسي لمحاكاة مونت كارلو التكيفية إجراء عدد متزايد من تجارب محاكاة مونت كارلو حتى تستقر النتائج المختلفة للاهتمام بالمعنى الإحصائي. يتم تحديد معيار تثبيت النتائج في طريقة محاكاة مونت كارلو التكيفية وفقاً لهدف التوصل إلى التسامح العددي المحدد، حيث يعرف التسامح العددي ( $\delta$ ) بأنه نصف عرض أقصر فاصل يحتوي جميع الأعداد التي يمكن التعبير عنها لعدد محدد من الأرقام العشرية الهامة، على سبيل المثال، التسامح العددي المرتبط بالقيمة العددية 2.3 هو  $d=0.05$ ، حيث يمكن لهذا العدد التعبير عن أي قيمة مشمولة بين 2.25 و 2.35 [20].

#### 4- خطوات تطبيق طريقة محاكاة مونت كارلو المتكيفة (AMCS) للتنبؤ بسلوك مكونات نظام

تستخدم محاكاة مونت كارلو (MCS) لمحاكاة الفشل في أنظمة الطاقة من خلال التنبؤ بسلوك مكونات النظام المدروس، وتعتبر المحاكاة التسلسلية الزمنية أحد أنواع MCS المستخدمة عندما يعتمد سلوك النظام على الأحداث السابقة. تحتاج محاكاة التسلسل الزمني إلى سجل مصطنع، ويمكن الحصول على هذا السجل عن طريق توليد الزمن المطلوب لمكونات النظام صعوداً وهبوطاً بشكل عشوائي [14].

لمحاكاة زمن الفشل (TTF) الذي يعبر عن مدة فشل المكون، يتم توليده بشكل عشوائي. بوساطة المعادلة (11):

$$TTF = -\frac{1}{\lambda} \ln(n) \quad (11)$$

حيث  $\lambda$  تمثل معدل فشل مكون النظام،  $n$  عدد عشوائي (يتراوح بين 0 و 1).

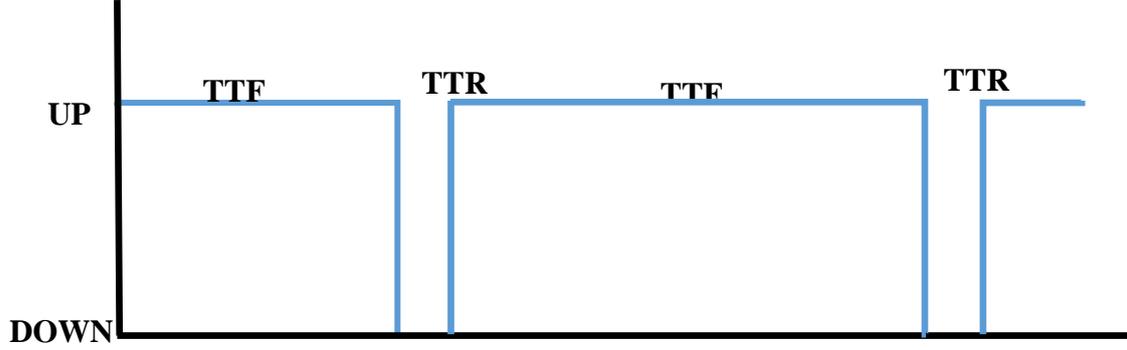
أما زمن الإصلاح (TTR) أو زمن الاستبدال، الذي يعبر عن الزمن اللازم لإصلاح أو استبدال المكونات المعطوبة، فيتم توليده أيضاً بشكل عشوائي. بوساطة المعادلة (12):

$$TTR = -\frac{1}{\mu} \ln(n) \quad (12)$$

حيث  $\mu$  تمثل معدل إصلاح المكون.

يتضح من المعادلات (11) و (12) أن TTF، TTR، يتبعان التوزيعات الأسية للتنبؤ بالسجل المصطنع لمكونات النظام، حيث يتم إنشاء TTF، TTR من أجل تغطية زمن المحاكاة (على سبيل المثال سنة واحدة). يوضح الشكل (6) مثلاً على سجل تشغيل احد المكونات للحصول على نتيجة دقيقة، يجب إجراء محاكاة مونت كارلو لعدد كبير من

الحالات، ويمكن زيادة زمن المحاكاة بحيث يصبح طويلاً جداً (على سبيل المثال ، 1000 عام أو أكثر)، وذلك اعتماداً على دراسة الحالة والدقة المطلوبة.



الشكل (6) سجل تشغيل احدى المكونات.

يوضح الشكلان (7 و 8) مخططان توضيحيان لتطبيق طريقة محاكاة مونت كارلو (MCS) في نظام التوزيع لأجل حالتين: الحالة الأولى بدون إضافة أنظمة الخلايا الكهروضوئية (PVS) إلى شبكة التوزيع، والحالة الثانية بعد إضافة أنظمة الخلايا الكهروضوئية (PVS) إلى الشبكة التوزيع.

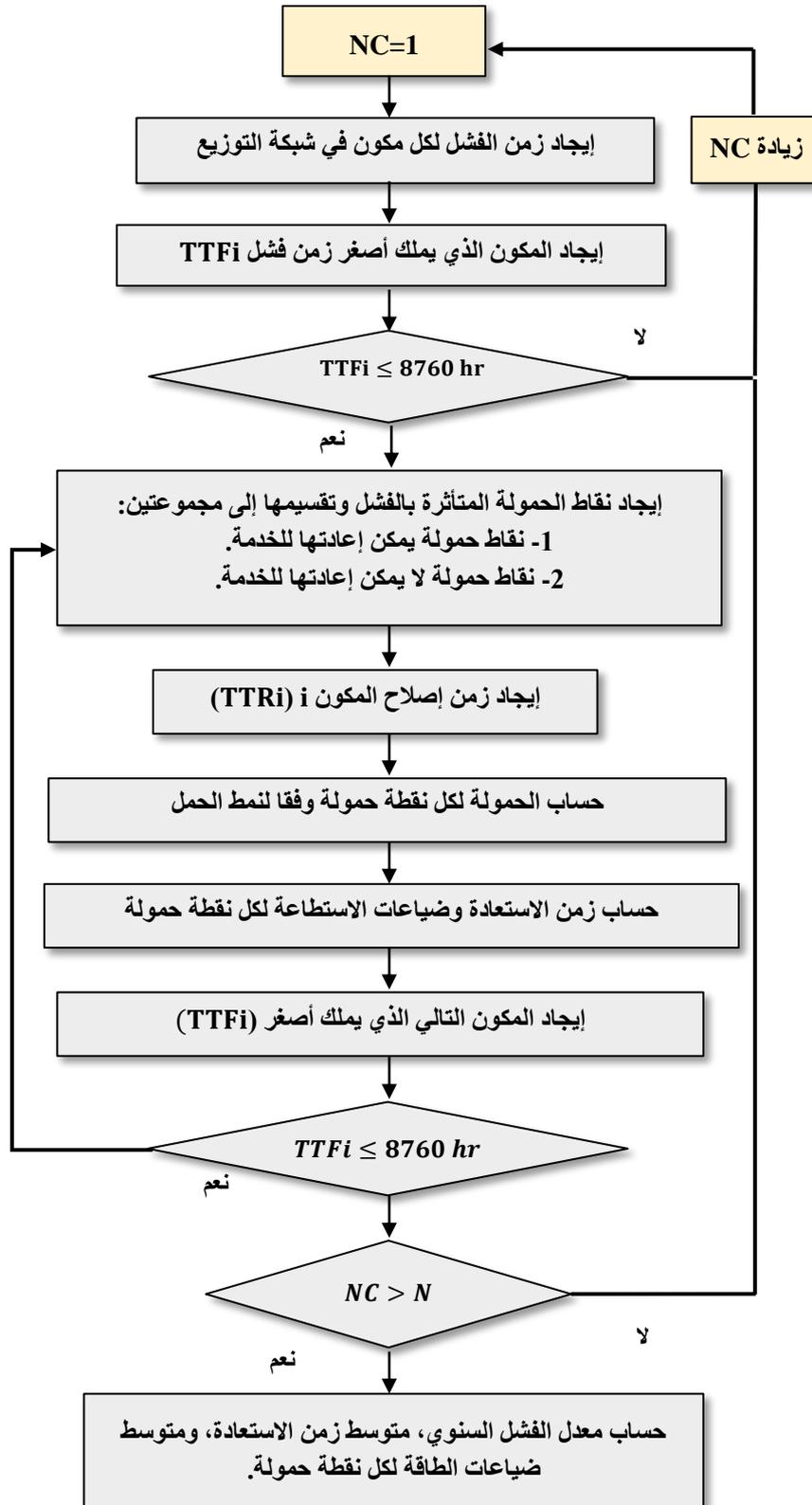
تتطلب محاكاة مونت كارلو التكريرية (AMCS) تنفيذ سلسلة من تطبيقات محاكاة مونت كارلو مرة بعد مرة PVS ومرة أخرى مع PVS. يظهر الشكل (9) المنهجية المقترحة لتنفيذ AMCS من أجل تقييم مؤشرات الموثوقية. ويمكن شرح المخطط الانسيابي على النحو التالي [20]:

- 1- يتم اختيار متغيرات التحكم في العملية كما يلي :
  - احتمالية التغطية المرغوبة  $p$  لفاصل الثقة (في دراستنا  $p = 95\%$ ).
  - عدد الأرقام العشرية الهامة  $n_{dig}$  من أجل حالة عدم اليقين  $u(y)$  (في دراستنا  $n_{dig}=1$ ).
  - عدد التجارب التي يجب إجراؤها في كل تسلسل من تطبيق العملية، حيث يؤخذ كمضاعف  $(1/(1-p))$  للمساعدة في تحديد أقصر فترة تغطية. (في دراستنا تم استخدام 8000 تجربة لكل تسلسل من محاكاة مونت كارلو).
- 2-  $h=1$  تشير إلى التطبيق الأول لـ MCS في التسلسل.
- 3- تنفيذ  $N$  تجربة من MCS، التي تعطي القيم  $y_r (r = 1, \dots, N)$ ، حيث  $y_r$  هو مجموع متوسط معدل الفشل في شبكة التوزيع لكل تجربة من تسلسل محاكاة مونت كارلو، كما تعطي المعايير التالية:
  - يتم حساب المتوسط كقيمة تقديرية  $y$  من  $Y$ :

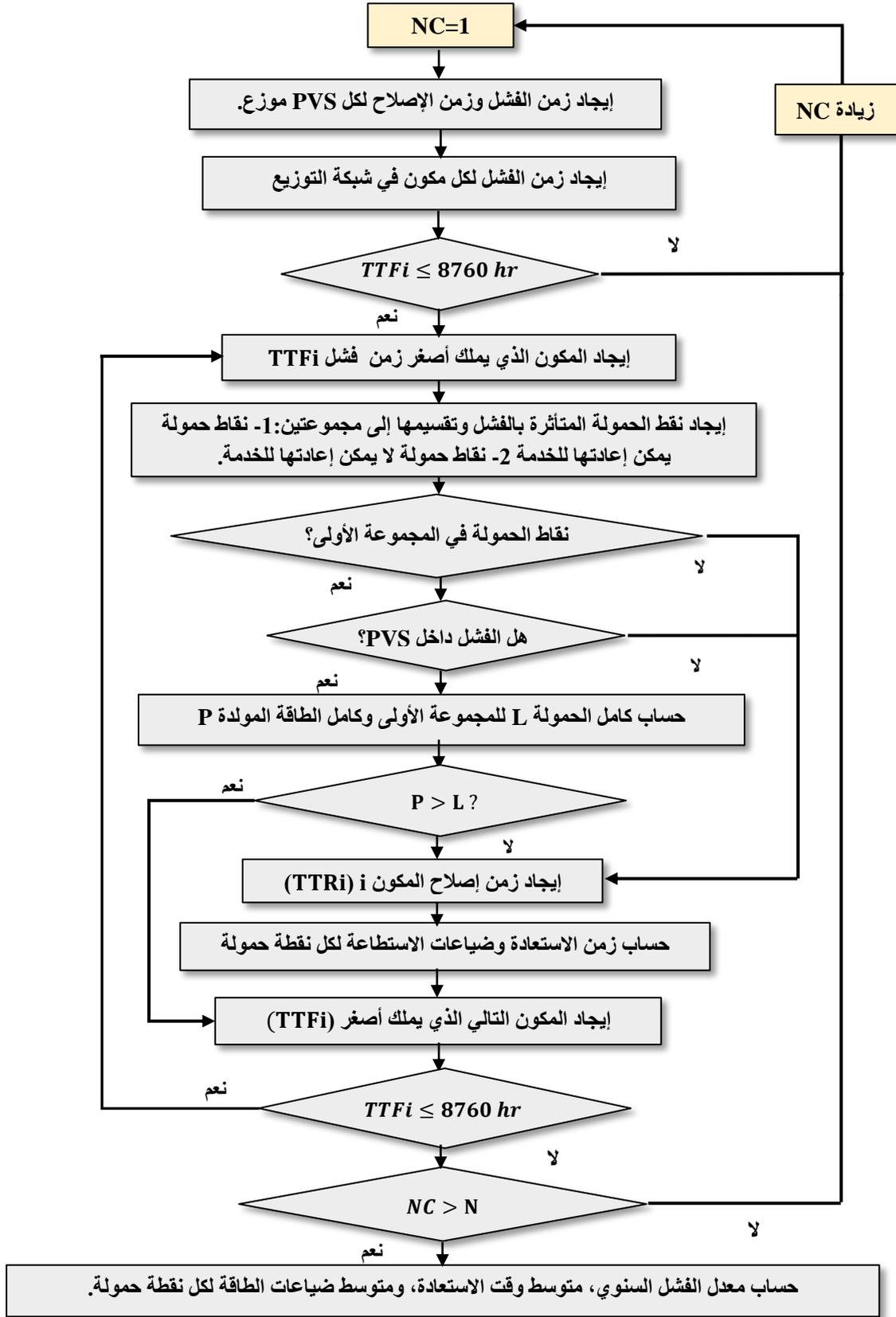
$$y^{(h)} = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N y_r \quad (13)$$

- حساب الانحراف المعياري باعتباره عدم اليقين المعياري  $u(y)$  المرتبط بـ  $y$ :

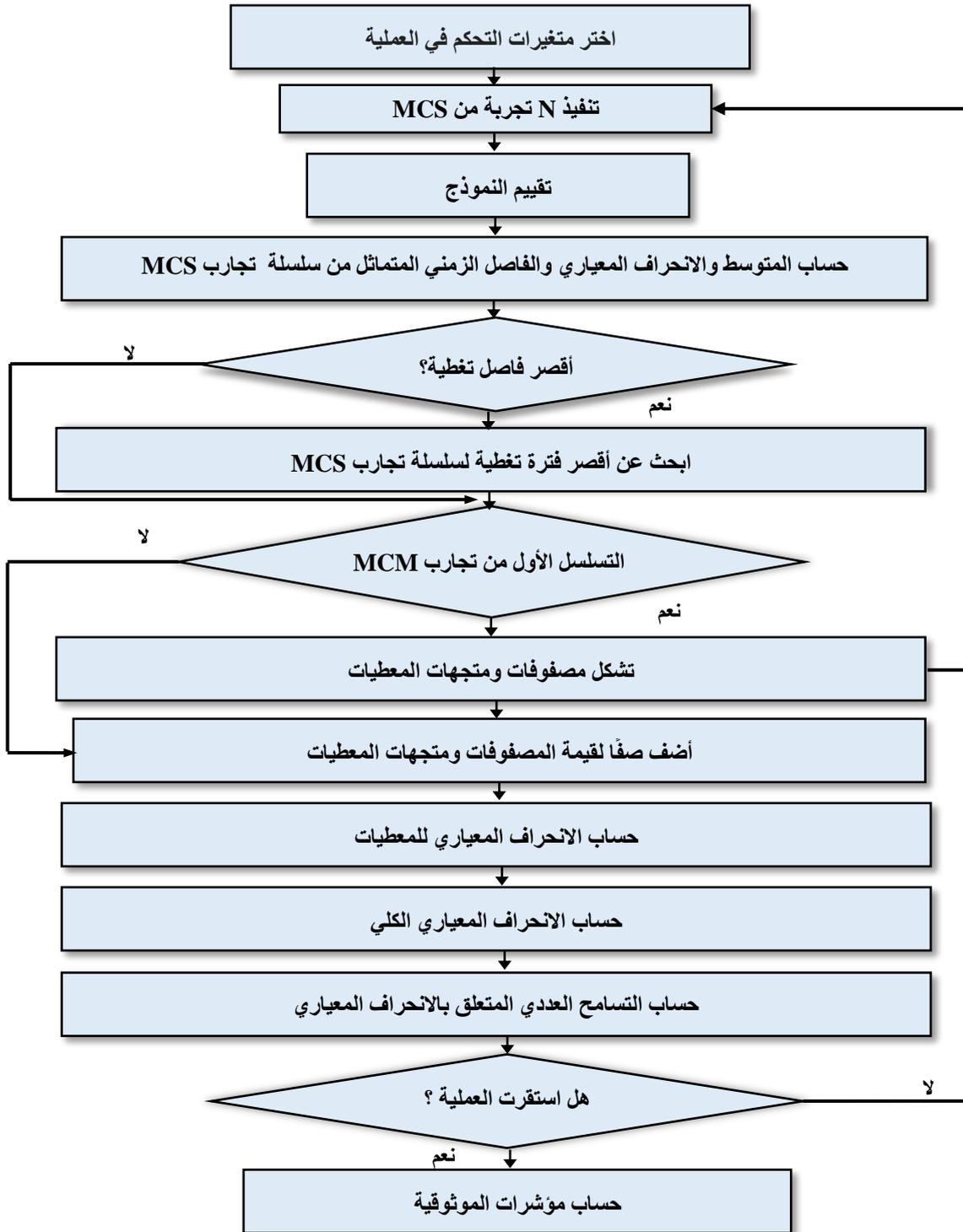
$$u(y^{(h)}) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{r=1}^N (y_r - y)^2} \quad (14)$$



الشكل (7) المخطط الانسيابي لخوارزمية محاكاة مونت كارلو من أجل تقييم موثوقية نظام التوزيع بدون PVS .



الشكل (8) المخطط الانسيابي لخوارزمية مونت كارلو من أجل تقييم موثوقية نظام التوزيع بوجود PVS.



الشكل (9) المخطط الانسيابي لخوارزمية مونت كارلو المتكيفة (AMCM) من أجل تقييم موثوقية نظام التوزيع.

- نضع  $q$  الجزء الصحيح من  $pN + 1/2$ . من أجل تصنيف قيم  $y_r (r = 1, \dots, N)$  في ترتيب غير تنازلي، بالتالي فإن فاصل التغطية الاحتمالي لـ  $Y$  سيكون  $[y_{low}^{(h)}, y_{high}^{(h)}]$ . يتم وضع الفواصل الزمنية  $y_{low}^{(h)} = y_r$  حيث  $y_{high}^{(h)} = y_{(r+q)}$  هي جزء صحيح من  $(N - q)/2 + 1/2$ ، بحيث تكون النتيجة المرغوبة هي أقصر فترة

تغطية مطلوبة، يجب تحديد القيمة  $r^*$  بحيث  $y_{(r^*+q)} - Y_{(r^*)} \leq Y_{(r+q)} - Y_r$  لكل من القيم  $r = 1, \dots, (N - q)$ .

4- إذا كان  $h = 1$ ، فيجب زيادة  $h$  بواحد والعودة إلى الخطوة (3).

5- حساب الانحراف المعياري  $s_{\hat{y}}$  المرتبط بمتوسط التقديرات  $y(1), \dots, y(h)$  من أجل  $Y$ ، والتي تعطى بواسطة المعادلة (15):

$$s_{\hat{y}} = \sqrt{\frac{1}{h-1} \sum_{i=1}^h (y^{(i)} - \hat{y})^2} \quad (15)$$

حيث متوسط التقديرات:

$$\hat{y} = y = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h y^{(i)} \quad (16)$$

6- يتم حساب المعايير التالية لهذه الإحصائية:

• من أجل عدم اليقين القياسي:

$$\hat{u}(y) = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h u(y^{(i)}) \quad (17)$$

$$s_{\hat{u}(y)} = \sqrt{\frac{1}{h(h-1)} \sum_{i=1}^h (u(y^{(i)}) - \hat{u}(y))^2} \quad (18)$$

• من أجل أصغر فاصل تغطية:

$$\hat{y}_{\text{low}} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h y_{\text{low}}^{(i)} \quad (19)$$

$$s_{\hat{y}_{\text{low}}} = \sqrt{\frac{1}{h(h-1)} \sum_{i=1}^h (y_{\text{low}}^{(i)} - \hat{y}_{\text{low}})^2} \quad (20)$$

• من أجل أكبر فاصل تغطية:

$$\hat{y}_{\text{high}} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h y_{\text{high}}^{(i)} \quad (21)$$

$$s_{\hat{y}_{\text{high}}} = \sqrt{\frac{1}{h(h-1)} \sum_{i=1}^h (y_{\text{high}}^{(i)} - \hat{y}_{\text{high}})^2} \quad (22)$$

7- يتم استخدام جميع قيم النموذج  $h \times N$  المتاحة لتشكيل  $u(y)$ .

- 8- حساب التسامح العددي  $\delta$  المرتبطة بـ  $u(y)$ . التسامح هو نصف الرقم الكبير الأخير من عدم اليقين. يجب التعبير عن الارتياح في الشكل التالي  $u(y) = c \times 10^d$ ، حيث  $c$  هو عدد صحيح عشري ( $n_{dig}$ ) و  $d$  عدد صحيح؛ أما التسامح العددي المرتبط به، هو:  $\delta = \frac{1}{2} 10^d$ .
- 9- يكون معيار تحديد النتائج كما يلي: إذا كانت أي قيمة من القيم التالية  $2s_{\hat{y}}, 2s_{\hat{u}(y)}, 2s_{\hat{y}_{low}}, 2s_{\hat{y}_{high}}$  تتجاوز  $\delta$ ، يجب زيادة  $h$  بواحد والعودة إلى الخطوة (3).
- 10- عندما يتم التحقق من معيار تثبيت النتائج، يمكننا عندها حساب مؤشرات الموثوقية.

## النتائج والمناقشة:

### تحديد حجم وموقع أنظمة الخلايا الكهروضوئية

لقد تم تطبيق خوارزمية محاكاة مونت كارلو المتكيفة على شبكة اختبارية RBTS Bus2، الخصائص الأساسية لهذه الشبكة موجودة في المرجع [21]، معدل الفشل ومتوسط زمن الإصلاح لأنظمة الخلايا الكهروضوئية (PVS) هو 0.1 f/yr و 20 h، على التوالي [15]. كثافة الإشعاع الشمسي موضحة في الجدول D في الملحق 1. لدراسة تأثير أنظمة الخلايا الكهروضوئية على شبكة التوزيع الاختبارية المضيفة، قمنا بتحديد الحجم والموقع المناسب لها، وذلك بهدف تقليل معدل فشل نقاط الحمولة وبالتالي زيادة موثوقية النظام المدروس، حيث تم تحديد الحجم المناسب كالتالي:

- 1- تم تحديد 30% من ذروة الحمولة المتوقعة للشبكة كمستوى استطاعة أنظمة الخلايا الكهروضوئية (PVS) المضافة إلى الشبكة [11].
- 2- نعتبر أن استطاعة كل PVS هي 1500kw.
- نتيجة لذلك فإن أكبر عدد من أنظمة الخلايا الكهروضوئية التي يمكن إضافتها إلى الشبكة يساوي مستوى استطاعة أنظمة الخلايا الكهروضوئية (PVS) مقسوماً على استطاعة كل PVS، بالتالي يكون العدد الأعظمي لأنظمة الخلايا الكهروضوئية (PVS) التي يجب إضافتها إلى الشبكة هو:

$$(0.30 \times 20001 \text{KW}) / 1500 \text{KW} = 4.0001 \approx 4$$

حيث (20001KW) هي ذروة الحمولة المتوقعة للشبكة الاختبارية.

أما بالنسبة للموقع المناسب فقد تم اختيار أقسام الخطوط التي تشمل أكثر معدلات فشل لنقاط الحمولة. حيث تم الحصول على هذه المعدلات من خلال تطبيق الخوارزمية (AMCS) بدون وجود PVS، أنظر إلى الشكل (10). من أجل تحديد موقع PVS فقد تم الأخذ بالحسبان القيود التالية:

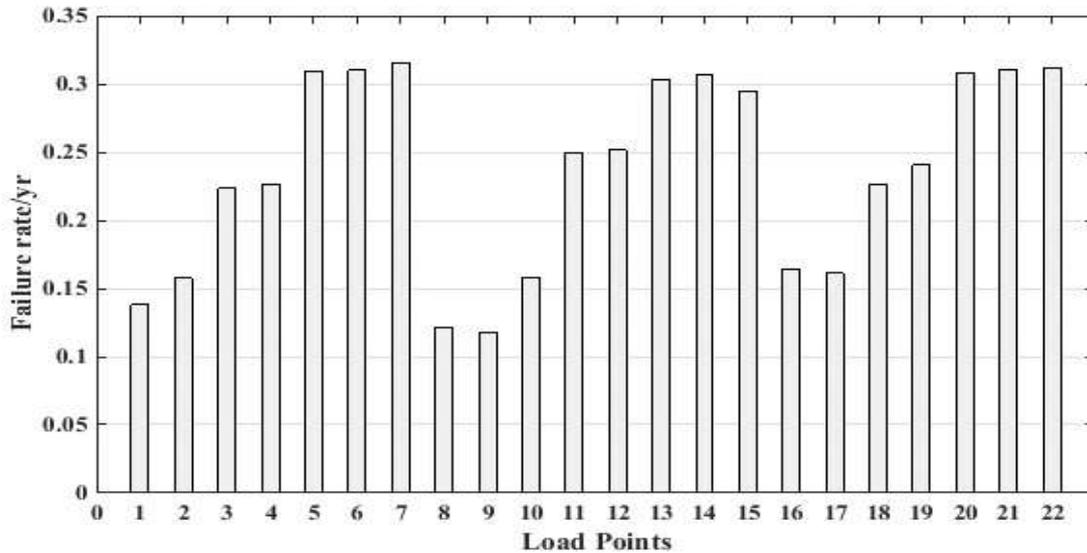
- 1- يضاف إلى قسم الخط المرشح مولد موزع واحد فقط.
  - 2- جميع المولدات الموزعة المضافة لها نفس الاستطاعة.
  - 3- يجب تحديد الاستطاعة الأعظمية لأنظمة الخلايا الكهروضوئية التي يجب إضافتها إلى الشبكة.
- الطريقة المقترحة لتقييم موثوقية نظام التوزيع المدروس تدرس حالتين مختلفتين، أنظر إلى الجدول (1):
- 1- الحالة الأولى: النظام المدروس بدون PVS مع الأخذ بالحسبان تقلبات الحمولة العشوائية.

2- الحالة الثانية: النظام المدروس مع PVS، مع الأخذ بالحسبان الحجم والموقع المناسب لل PVS، حيث أنه تم اعتبار المكان المناسب هو بالقرب من نقاط الحمولة ذات أعلى معدل فشل. بالإضافة لذلك، تم الأخذ بالاعتبار تقلبات الحمولة العشوائي وعدم اليقين من خرج ال PVS، انظر إلى الشكل (11).

الجدول (1) حالتي النظام المدروس.

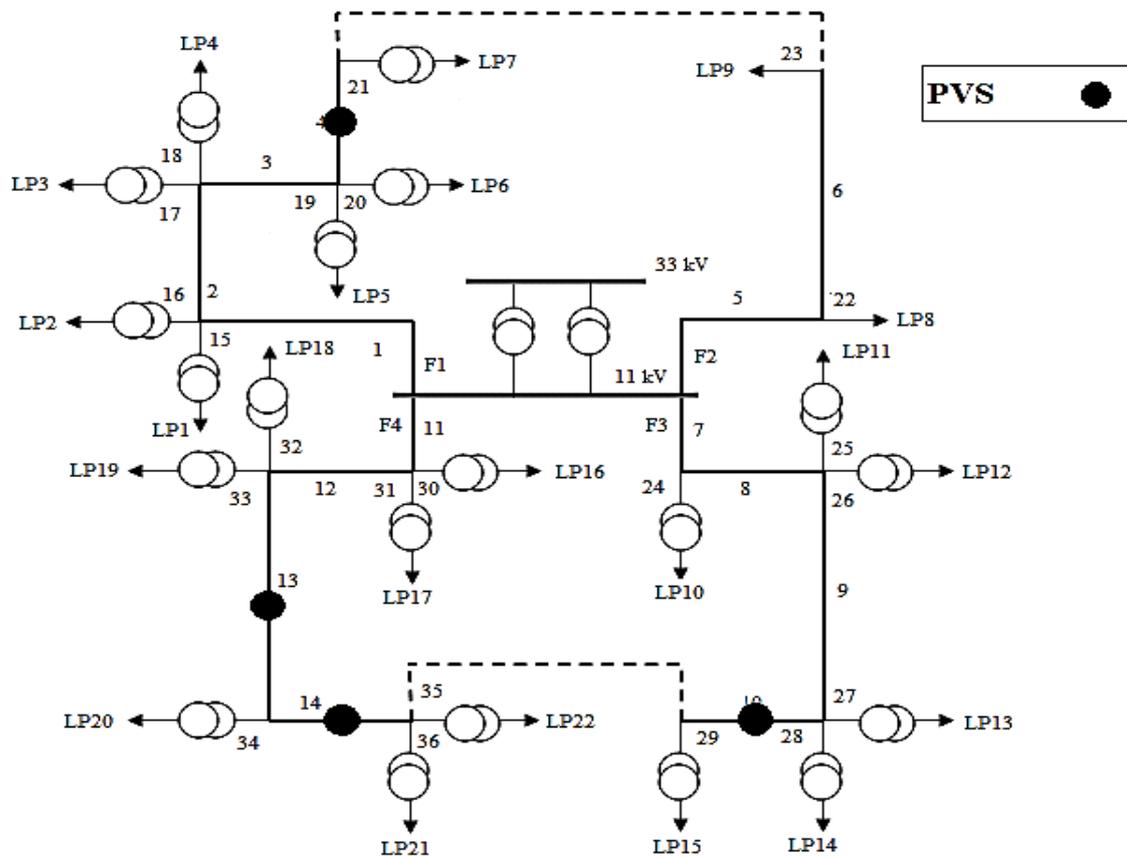
رقم قسم الخط الحاوي على PVS	الحجم المقترح لأنظمة الخلايا الكهروضوئية	NO.
-	بدون PVS	الحالة الأولى
4-10-13-14	بوجود PVS (الحجم والموقع المناسب المقترح)	الحالة الثانية

لقد تم تطبيق محاكاة مونت كارلو المتكيفة وغير المتكيفة لأجل الحالتين المذكورتين أعلاه (8000 تجربة لكل سلسلة من العملية) باستخدام بيئة ال MATLAB البرمجية، يبين الجدول (2) مقارنة الخصائص الإحصائية لكل منهما. نلاحظ من هذا الجدول انخفاض الخصائص الإحصائية الأساسية (التباين، الخطأ المعياري، والانحراف المعياري) عند تطبيق الخوارزمية المتكيفة، وذلك لأنها تتيح التحكم التام في العملية وتعطي نتائج أكثر دقة وموثوقية، حيث أنه لأجل  $n\_dig = 1$  واحتمالية تغطية العملية 95%، ظهر لدينا  $16 \times 10^3$  تقييم من أجل الحالة الأولى والثانية حتى تم استقرار النتائج.



الشكل (10) معدل الفشل السنوي لنقاط الحمولة في غياب PVS.

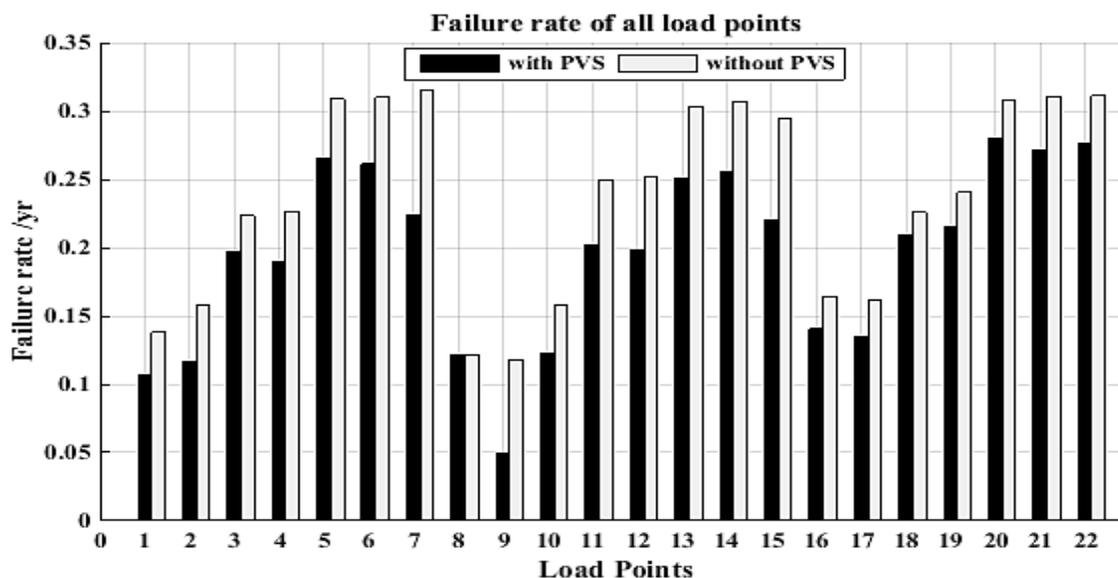
لقد أظهر تطبيق الخوارزمية المقترحة انخفاضاً في معدل الفشل السنوي لنقاط التحميل كنتيجة لإضافة أنظمة الخلايا الكهروضوئية (PVS) إلى الشبكة، أنظر إلى الشكل (12). كما أنه انخفض معدل الضياعات السنوي في نقاط التحميل، أنظر إلى الشكل (13).



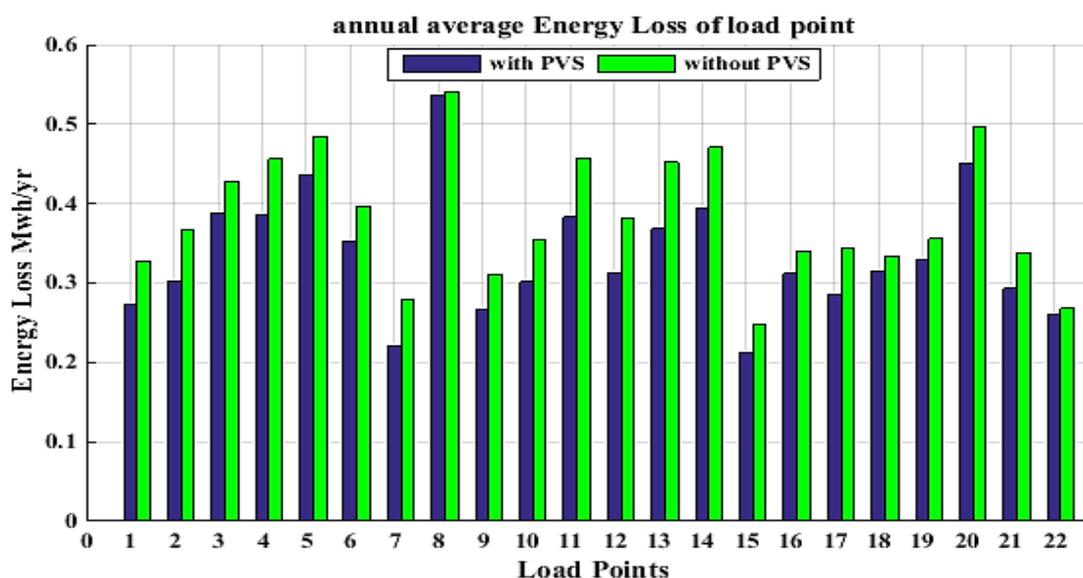
الشكل (11) النظام المدروس - حالة (2).

الجدول (2) مقارنة الخصائص الإحصائية للطريقتين ضمن حالات الدراسة.

الحالات المدروسة		الحالة الأولى	الحالة الثانية
طريقة محاكاة مونت كارلو المتكيفة (AMCS)	variance	4.8824	4.0547
	Standard error	0.1145	0.1039
	Standard deviation	10.2428	9.2929
طريقة محاكاة مونت كارلو غير المتكيفة (Non-AMCS)	variance	5.0031	4.1575
	Standard error	0.1160	0.1051
	Standard deviation	10.3779	9.4016



الشكل (12) معدل الفشل السنوي لحالتي الدراسة.



الشكل (13) معدل الضياعات السنوي في نقاط الحمولة لحالات الدراسة.

يعكس هذا الانخفاض تحسناً في مؤشرات الموثوقية (EENS, SAIFI, SAIDI, CAIDI) بمقدار ( 12.5%, 5%, 13%, 17%) على التوالي، أنظر إلى الجدول (3)، يعود هذا التحسن لكون أنظمة الخلايا الكهروضوئية توفر مصدر احتياطي للطاقة عند عدم توفر المصدر الرئيسي.

بالعودة إلى النظام المدروس بدون PVS، وملاحظة الشكل (10)، نجد أنه لنقاط التحميل الموجودة في نهاية الخطوط الرئيسية معدل فشل عالي، لأن الأعطال الدائمة تؤدي إلى عزل نقاط التحميل هذه عن المصدر الرئيسي، لكن أصبح لنقاط التحميل الموجودة عند نهاية الخط الرئيسي معدلات فشل أقل بعد إضافة الـ PVS إلى النظام الاختباري، يرجع هذا الانخفاض إلى زيادة استطاعة التوليد المقدمة من أنظمة الخلايا الكهروضوئية أثناء انقطاع المصدر الرئيسي.

الجدول (3) مؤشرات الموثوقية لأجل الحالات المدروسة.

مؤشرات الموثوقية	الحالة الأولى	الحالة الثانية
SAIFI (int/yr)	0.2025	0.1681
SAIDI (hr/yr)	0.8570	0.7461
CAIDI (hr/int)	4.2314	4.4393
EENS (MWh/yr)	8.4332	7.3772

### الاستنتاجات والتوصيات:

يُعد تقييم الموثوقية من أهم الدراسات التي يجب القيام بها عند تخطيط واستثمار شبكات التوزيع الكهربائية، حيث يجب عليها أن تعمل بشكل اقتصادي مع المحافظة على الحد الأدنى من انقطاع التغذية عن المستهلك. لقد تم في هذا البحث استخدام محاكاة مونت كارلو المنكيفة لتقييم مؤشرات الموثوقية في شبكات التوزيع لأجل حالتين: الأولى بدون أنظمة الخلايا الكهروضوئية والثانية مع أنظمة الخلايا الكهروضوئية. لقد تم استخدام نموذج عشوائي لأنظمة الخلايا الكهروضوئية وذلك لمحاكاة التقطع في شدة الإشعاع الشمسي لكي تكون الدراسة أكثر واقعية. لقد أثبت هذا البحث تفوق محاكاة مونت كارلو المنكيفة على محاكاة مونت كارلو غير المنكيفة، حيث بينت النتائج التي حصلنا عليها أن استخدام AMCS يؤدي إلى السيطرة الكاملة على العملية وعلى معايير تثبيت النتائج، كما بينت النتائج التأثير الإيجابي الكبير لإضافة أنظمة الخلايا الكهروضوئية على موثوقية شبكات التوزيع.

### المراجع:

- [1] I, Bae; J, Kim (2008). Reliability Evaluation of Customers in a Microgrid, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 23, No. 3, pp. 1416-1422, August 2008.
- [2] Z, Li; Q, Xu; Z, Li (2011). Reliability analysis of distributed system with DGs, 4th Int. Conf. on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), China, 2011 pp. 14-17.
- [3] Bae, I; Kim, J (2008). Reliability Evaluation of Customers in a Microgrid. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23, 1416-1422.
- [4] L, Husshi; S, Jian; L, Sige (2010). Reliability evaluation of distribution system containing microgrid, China International Conference Electricity Distribution (CICED), September, 2010, pp. 1-6.
- [5] S, Cha; D, Jeon; I, Bea; L, Il-Ryon; J, Kim (2004). Reliability Evaluation of Distribution System Connected Photovoltaic Generation Considering Weather Effects, 8th Int. Conf. on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Iowa State University, Ames, Iowa, Sep 12-16, 2004 pp. 451-456.
- [6] M, Khallat; S, Rahman (1986). A Probabilistic Approach to Photovoltaic Generator Performance Prediction, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. Ec-1, No. 3, pp.34-40, September 1986.
- [7] Sutoh T; Suzuki H; Sekine Y (1987). Economic Evaluation of a Residential Photovoltaic System Based on a Probability Model Using Actual Meteorological Data. IEEE Trans Energy Convers 1987.

- [8] Arman Amini; Badr Navid; Taghizadegan Kalantari (2017). Reliability Evaluation Of Radial Distribution Systems Including Distributed Generation Based On An Improved Classification Algorihm, 2017.
- [9] Zou, K; Agalgaonkar, AP; Muttaqi, KM; Perera S (2014). An analytical approach for reliability evaluation of distribution systems containing dispatchable and nondispatchable renewable DG units. IEEE Trans Smart Grid 2014.
- [10] Billinton R. I R - 1999;14:397-403.
- [11] Silva, ENM; Rodrigues, AB; Da, Guia; Da, Silva M (2016). Stochastic assessment of the impact of photovoltaic distributed generation on the power quality indices of distribution networks. Electr Power Syst Res 2016.
- [12] Solaguren-Beascoa Fernández M; Alegre Calderón, JM; Bravo Díez, PM (2009). Implementation in MATLAB of the adaptive Monte Carlo method for the evaluation of measurement uncertainties. Accredited Qual Assur 2009.
- [13] الدكتور علي حمزة، أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية، جامعة دمشق، " تكامل التوليد الموزع-2011. في أنظمة التوزيع الكهربائية 2010 "
- [14] Alkuhayli, AA; Raghavan, S; Chowdhury, BH (2012). Reliability evaluation of distribution systems containing renewable distributed generations. 2012 North Am Power Symp NAPS.
- [15] Goswami, PK; Chowdhury, S; Chowdhury, SP; Song, YH; Das, JK (2007). Reliability evaluation of distribution system. Proc Univ Power Eng Conf 2007.
- [16] Lin, S; Han, M; Fan, R; Hu, X (2011). Configuration of energy storage system for distribution network with high penetration of PV BT - IET Conference on Renewable Power Generation, RPG 2011, May 9, 2011 - September 8, 2011.
- [17] Cha, S; Jeon, D; Bae, I; Lee, I (2004). Reliability evaluation of distribution system connected photovoltaic generation considering weather effects. Probabilistic Methods Appl to Power Syst 2004 Int Conf.
- [18] Billinton, R; N, Allan R (1996). Reliability Evaluation of Power Systems. Biomaterials 1996;29:4471-80.
- [19] Harrison, RL; Carlo, M (2011). Introduction To Monte Carlo Simulation. NIH Public Access 2011:17-21.
- [20] BIPM, JCGM 101(2008). Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method. Evaluation 2008;JCGM. precisioneng. 2005.07.003.
- [21] R, N, Allan; R, Billinton; I, Sjarief; L, Goel KSS (1991). A Reliability test system for educational purposes - basic distribution system data and results. Electr Group, Power Syst Syst Power 1991.

### الملحق (1)

الجدول (D) شدة الإشعاع الضوئي الشهرية ( $KW \cdot \frac{hr}{m^2}$ )

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
5.92	7.16	8.78	10.23	11.11	11.42	11.23	10.50	9.22	7.59	6.17	5.52