المجلة الدولية للهندسة وتقنية المعلومات
journal homepage:www.ijeit.misuratau.edu.ly
IJEIT
جامعة مصراتة MISURATA UNIVERSITY

دراسة وتحليل لأهم برامج المحاكاة للمنظومة الشمسية الكهروضوئية (ورقة مراجعة)

حنين عبدالسلام الجبو
مركز الطاقات المتجددة ، جامعة مصراتة
abdhaneen694@gmail.com

هناء محمد بن غزي
مركز الطاقات المتجددة ، جامعة مصراتة
hanaabengozzi@gmail.com

محمد إدريس سالم أبوزيد
كلية الهندسة، قسم الهندسة الكهربية والإلكترونية، جامعة مصراتة
m.abozaed@eng.misuratau.edu.ly

الملخص— **يوجد عدد من البرمجيات المتاحة حاليا في السوق لمحاكاة أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية، حيث تستخدم هذه البرمجيات في تصميم المنظومات الشمسية الكهروضوئية تصميما كاملا؛ يشمل المكونات الرئيسية للمنظومة ونتائج التحاليل للطاقة الناتجة والفقد والمنحنيات المختلفة في تقيم أداء المنظومة بالإضافة للتحاليل الاقتصادية والتخطيط و المراقبة والتحكم وخرائط الإشعاع الشمسي وغيرها من التحاليل المهمة للمنظومة الكهروضوئية. في هذه الورقة تم دراسة ووصف وتقييم عدد من أهم هذه البرمجيات وذلك اعتمادا على مزاياها وعيوبها في مختلف مراحل تصميم الأنظمة الكهروضوئية. كنتائج لهذه الدراسة واعتمادا على المزايا والعيوب لهذه البرمجيات؛ تقدم هذه الورقة للمستخدم البرمجيات الأفضل والأجود في تصميم هذه المنظومات، وكذلك تقدم اختيار برامج المحاكاة التي تختص بمهمة معينة ومحددة.**

الكلمات المفتاحية— **أنظمة الطاقة الشمسية، برمجيات أنظمة الطاقة الشمسية، مكونات المنظومة الشمسية، تصميم المنظومات الشمسية.**

1. المقدمة

يعتبر النظام الكهروضوئي أحد التقنيات الناشئة وسريعة النمو بين جميع مصادر الطاقة المتجددة الأخرى[1] . لتصميم هذا النظام يحتاج إلى عمليات حسابية طويلة أو محاكاة عن طريق برامج خاصة بهذا النظام الكهروضوئي، وهو نظام ذو تكلفة عالية حيث يضم مكونات ومعدات باهظة الثمن مثل البطاريات ووحدة التحكم والعاكس والألواح الكهروضوئية، ولهذا يجب الدقة في حساب واختيار هذه المكونات والمعدات لتقليل التكلفة أقل ما يمكن [2]، من هنا كانت المحاكاة مهمة جدا لتصميم هذا النظام فالهدف الرئيسي لتصميم وتخطيط أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية هو الاختيار الدقيق لمكونات تركيب النظام المستقل وحجمها كما هو مطلوب [3]. ويعني النظام "المستقل أو خارج الشبكة" أنهم المصدر الوحيد للطاقة لمنزل ، أو تطبيقات أخرى مثل البيوت البعيدة ، مواقع الاتصالات ، ضخ المياه ، إنارة الشوارع أو صندوق مكالمات الطوارئ على الطرق السريعة [4]. تم استخدام وتطبيق برامج المحاكاة على الكثير من المجالات المختلف مثل نظام الكمبيوتر والاتصالات والتصنيع ومناولة المواد وصناعة السيارات والنقل والرعاية الصحية والعديد من المجالات الأخرى. أدت التطورات الحديثة والتطورات التقنية في مجال نمذجة المحاكاة إلى جعلها شائعة، وتعد المحاكاة اليوم الأداة الأكثر استخدامًا والمقبولة في تحليل النظام والبحث والتطوير. يزداد السوق اليوم وبشكل مستمر في رواج عدد برامج المحاكاة المختصة بالأنظمة الكهروضوئية والذي أصبح اليوم الوصول إليها أكثر سهولة نظرًا لتوفرها بلغات بسيطة ولغات متعددة، وكذلك قيامها بمهام مختلفة ومتعددة وذلك حسب نوع المهمة والتطبيق [5].

استلمت الورقة بالكامل في 5 اغسطس 2022 وروجعت في 15 سبتمبر 2022 وقبلت للنشر في 27 سبتمبر 2022

ونشرت ومتاحة على الشبكة العنكبوتية في 2 اكتوبر 2022

لتسهيل عملية المحاكاة وسرعة نتائجها، اشتغل الباحثون على توفير هذه المحاكاة أنولان على الشبكة العنكبوتية [6] بالإضافة إلى توفرها في السوق. حيث يوجد إلى ما يربو على خمسين برنامج محاكاة للطاقة الشمسية الكهروضوئية صغيرًا أو كبيرًا تم تصنيفه بشكل أساسي في أداة المحاكاة وأدوات التقييم الاقتصادي والأدوات ذات الصلة بالصناعة الكهروضوئية وأدوات التحليل والتخطيط وأدوات المراقبة والتحكم وخرائط الإشعاع الشمسي. من أشهر هذه البرامج المختصة بأدوات المحاكاة هي INSEL و TRNSYS، أدوات التقييم الاقتصادي هي HOMER وSAM (Solar Advisor Model) و RETScreen و SOLinvest و EnergyPeriscope، الأدوات المتعلقة بالصناعة الكهروضوئية هي APOS الكهروضوئية StatLab ومنصة تحليل الخلايا الكهروضوئية العضوية وPV، أداة محاكاة التكلفة، أدوات التحليل والتخطيط هي PVPlanner وArchelios و String Design Tool وSOL * PV و BlueSol و F-CHART PV ومصمم Solmetric PV و DDS-CAD PV و Polysun و REA System Sizing Tool و PVSYST و Solar Pro و PV Professional و Solarius- PV و Matel Grid. أدوات المراقبة والتحكم هي Meteocontrols و SPYCE و PVspot و Autodesk ECOTECT Analysis و Skelion، خرائط الإشعاع الشمسي هي Solar Focus و SolarGIS و TIER3 و PVGIS. بينما بعض البرامج تعتمد على الإنترنت مثل PV-Phil و SolarDesignTool و oTilt و PVwizard و CalSol Logiciel [5].

تقدم هذه الورقة بعض من هذه البرامج الرئيسية والمميزة المتوفرة في السوق وتقدم جل المعلومات المهمة في التقييم الخاصة بها.

2. برامج المحاكاة للمنظومة الكهروضوئية الهامة

لكي يكون العمل صحيحا ودقيقا في عملية التصميم الكامل للمنظومة الشمسية الكهروضوئية، يجب أن يكون المصمم على دراية تامة وملم بعملية حساب وتحجيم الأحمال وتصميم المنظومة بدون استخدام أي من برامج للمحاكاة مما يعطي المصمم الحس الهندسي والتصميمي عند استخدام أي من برمجيات المحاكاة للتحقق من صحة التصميم والتطبيق. الوصف التفصيلي لجميع البرامج الرئيسية لمحاكاة المنظومة الكهروضوئية يمكن حصره على النحو التالي:

أ. النموذج الهجين الأمثل للطاقة الكهربائية المتجددة (HOMER)

كلمة HOMER هي اختصار Hybrid Optimization Model for Electric Renewable، ولقد أسس هذا البرنامج الدكتور ليلينثال لشركة HOMER Energy LLC في عام 2009 [7]. هذا البرنامج يعتمد على النموذج المبسط لتصميم أنظمة التوليد الموزع (DG) داخل وخارج الشبكة. تسمح خوارزميات تحليل الحساسية والتحسين الخاصة بشركة HOMER لواجهة المستخدم بتقييم الجدوى الاقتصادية والتقنية لعدد كبير من خيارات التكنولوجيا ومراعاة الاختلافات في تكاليف التكنولوجيا وتوافر موارد الطاقة. يمتاز هذا البرنامج حساب CAPEX وOPEX، محاكاة مصادر الطاقة المتعددة، تضمين عوامل مثل سرعة

الرياح وتكلفة الوقود[7]. ويعاب عليه لا تولد بيانات منحنى IV أو تقوم بتحليل التظليل، تقرير توليد الكهرباء الكهروضوئية هو أقل شمولا وتفصيلا بسبب محدودية المعلومات عن بيانات الطقس وبيانات الوحدة، لا يتم إضافة العديد من عوامل الخسارة أثناء توليد الطاقة الكهروضوئية إلى الحساب[7]. يكلف هذا البرنامج مبلغ وقدره 4200 دولار للنسخة الدائمة المحملة بالكامل وهي متوفرة في المراكز التجارية، (شكل 1) [8] يوضح صور من البرنامج.

شكل1. واجهة لبرنامج homer

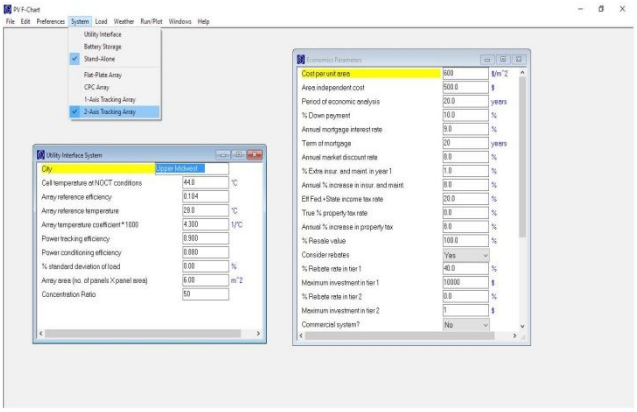
ب. *PV F-Chart*

F-CHART PV (شكل 2)، هو برنامج شامل لتحليل وتصميم النظام الكهروضوئي، حيث يوفر تقديرات الأداء المتوسط الشهري لكل ساعة من اليوم. تستند الحسابات إلى الأساليب التي تم تطويرها في جامعة ويسكونسن والتي تستخدم استخدام الإشعاع الشمسي لحساب التباين الإحصائي للإشعاع والحمل.

يمتاز هذا البرنامج بأنه يستهدف الأغراض الأكاديمية [7]. لديه قاعدة بيانات خاصة بالطقس لأكثر من 300 موقع و يمكن إضافة بيانات طقس لمواقع جديدة، وله خاصية تنفيذ سريع للغاية [9].

ويعيب عليه:

1. أنه لا يراعى الاختلافات الناجمة (نوعيه وكمية الإنتاج) عن الألواح الكهروضوئية والعواكس والمتغيرات الأخرى.
2. تتم إضافة جميع البيانات يدويًا وبالتالي يصعب مقارنة بيانات التوليد بسرعة عن طريق تبديل بيانات الوحدة أو سعة الموقع أو الموقع.
3. لا يوجد تحليل التظليل.
4. لا يوجد خيار لاستيراد بيانات الطقس من مصادر شائعة مثل TMY3.
5. لا مجال لإضافة بيانات العاكس إلى الحساب.



شكل2. واجهة برنامج PV F-Chart

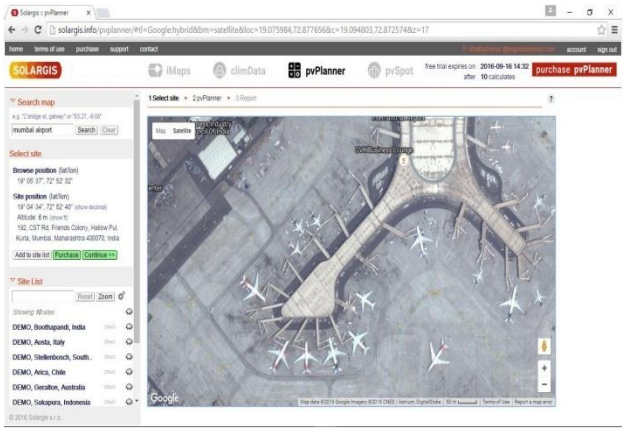
ج. PVPLANNER

يأتي هذا البرنامج مزودا بقاعدة بيانات الموارد الشمسية Solar GIS ، حيث يعمل على النظام الأساسيSaaS . البرنامج ذو بيانات دقيقة للغاية ويوفر نهجًا دقيقًا يزيد من موثوقية البيانات. يمتاز هذا البرنامج بأنه يسمح لبيانات الأقمار الصناعية الدقيقة للمستخدم معرفة تقديرات الإشعاع الشمسي وإمكانيات الطاقة الكهروضوئية لموقع ما، يمكنه كذلك إنشاء تقرير بـ 14 لغة، يقوم تلقائيًا بحساب تظليل التضاريس، تسمح خرائط الموارد الشمسية التفاعلية عالية الدقة (iMaps) للمستخدمين بتحديد الموقع بدقة، من ميزاته أيضا أنه يتم تضمين متوسط البيانات الشهرية والسنوية على المدى الطويل في الحزمة الأساسية [7] .

من عيوب هذا البرنامج:

1. لا توجد خيارات لإعداد الهياكل المحيطة أو القيام بتحليل التظليل لها.
2. إنه متاح فقط كنسخة عبر الإنترنت ، لذلك فإن الاتصال بالإنترنت إلزامي.
3. الواجهة أنيقة وبديهية ولكن قد يتأثر أداء الواجهة بسرعات اتصال الإنترنت التي تشكل عبئًا في البرامج عبر الإنترنت.
4. لا يوجد خيار لاستخدام أنواع البيانات الأخرى مثل بيانات ناسا أو Meteonorm أو SAM أو المستخدم المسجل يستخدم البيانات الموجودة في البرنامج فقط لا يمكن استدعاء أي بيانات جديدة.

يكلف هذا البرنامج حوالي 1700 دولار أمريكي[7]، (شكل 3) يوضح واجهة البرنامج.



شكل 3. واجهة برنامج PVPLANNER

د. *PV SYST*

يعتبر هذا البرنامج من أشهر برامج التصميم والمحاكاة الكهروضوئية في جميع أنحاء العالم. تم تطوير هذا البرنامج بواسطة الفيزيائي السويسري Andre Mermoud والمهندس الكهربائي Michel Villoz. يدعي المطورون أن هذا البرنامج مصمم ليتم استخدامه من قبل المهندسين بمختلف تخصصاتهم والباحثين والطلاب والمهتمين بمنظومات الكهوضوئية [7].

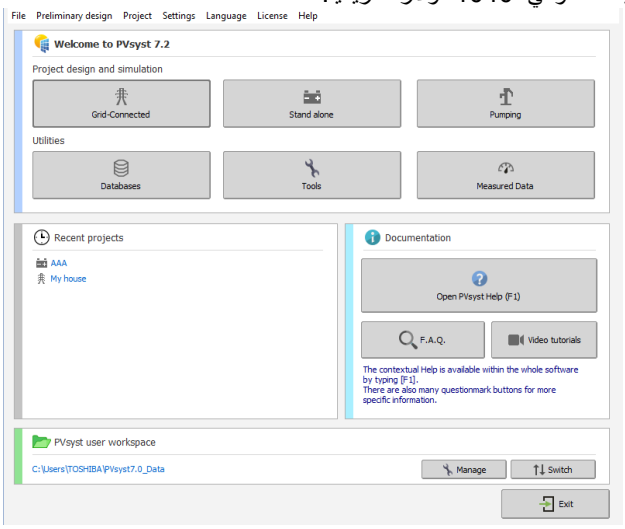
يوفر PVsyst منصة جيدة جدًا لجميع أنواع الاحتياجات لتحليل مشاريع الأنظمة الكهروضوئية بشكل أكثر فعالية، حيث يمكن استخدام هذا البرنامج لمحاكاة نظام متصل بالشبكة أو نظام قائم بذاته أو نظام ضخ المياه. الوظيفة الرئيسية الموجودة في النافذة الأمامية لبرنامج PVsyst مثل قاعدة البيانات والأدوات هو إعطاء التفاصيل المتعلقة بالمواقع الجغرافية ، وتوليد البيانات الاصطناعية كل ساعة ، وجداول البيانات والرسوم البيانية ، و إدخال بيانات meteo ، وإدخال بيانات ASCII meteo في قاعدة بيانات المكونات ، وكذلك توفر قاعدة البيانات تفاصيل للألواح الكهروضوئية ، والعواكس ، والبطاريات ، ومنظم المولدات ، ومنظم المضخات ، والعديد من التفاصيل الأخرى المتعلقة بالمصنعين والشركات المختلفة، (شكل4) يوضح واجهة البرنامج.

يوفر برنامج PVsyst خيارات متعددة للمستخدم لتصميم المشروع مثل التصميم الأولي وتصميم المشروع وقاعدة البيانات والأدوات. التصميم الأولي هو خطوة التحجيم المسبق للمشروع. يهدف تصميم المشروع في هذا البرنامج إلى إجراء تصميم شامل للنظام الكهروضوئي وتحليل الأداء باستخدام عمليات محاكاة مفصلة كل ساعة، يتم تنظيمها في إطار مشروع ، والذي يحتفظ بشكل أساسي بالحالة الجغرافية والموقع وبيانات الأرصاد الجوية كل ساعة. يمكن إجراء التحسينات وتحليل البارامترات من خلال

عمليات محاكاة مختلفة تسمى المتغيرات. تشمل الأدوات قاعدة بيانات meteo ، مع عروض رسومية أو جداول ومكونات.
قاعدة بيانات المكونات توفر تفاصيل للمنتجات المختلفة للشركات العالمية من الألواح الكهروضوئية ، والعواكس، والبطاريات والعديد من التفاصيل الأخرى المتعلقة بتصميم المنظومات الكهروضوئية.
من مميزات هذا البرنامج:

1. من السمات الرئيسية لهذا البرنامج التقدير السريع للإنتاج في مرحلة تخطيط المشروع ، والدراسة التفصيلية ، والتحجيم ، والتقدير بالساعة ، وإعداد التقارير .
2. يحاكي معظم البارامترات المطلوبة من قبل مصممي الأنظمة الكهروضوئية ويساعد على إنشاء تقرير محاكاة شامل.
3. قدرته على التعامل مع تحليل الظل.
4. يمكن ضم حوالي 15 مصدر من البيانات المختلفة التي تغطي معظم المناطق في جميع أنحاء العالم، و يمكن أيضا إضافة البيانات من قبل المستخدم [7].

يعاب على هذا البرنامج عدم استقرار محاكاة التظليل ولا توفر أي إشارات مرئية للتظليل، وكذلك لا يمكن تكبير شاشة البرنامج مما يجعلها مملة لرؤية جميع البارامترات في حالة الشاشة الصغيرة [7]. هذا البرنامج يكلف حوالي 1040 دولارًا أمريكيًا.



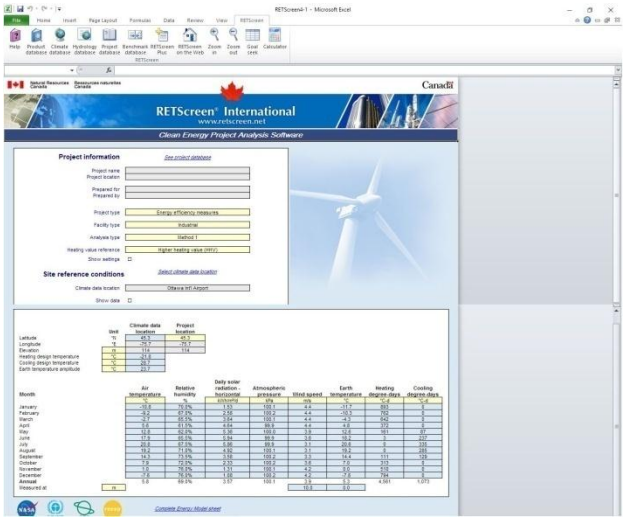
شكل 4. واجهة برنامج PVSYST

هـ. *RETScreen*

تم تطويره بواسطة National Resources Canada، وهو عبارة عن أداة برمجية لتحليل مشاريع الطاقة النظيفة تساعد المستخدم للوقوف على الجدوى الفنية والمالية للطاقة المتجددة المحتملة وكفاءة استخدام الطاقة ومشروعات التوليد المشتركة بشكل سريع وغير مكلف . متاح للتنزيل من موقع الموارد الوطنية بكندا [7].
مميزات هذا البرنامج :

1. أنه مجاني، و يتكون من جدول بيانات يستخدم لحساب أنواع مختلفة من مصادر الطاقة بما في ذلك الطاقة الشمسية الكهروضوئية ويسمح للمستخدم بحساب توليد الطاقة الكهروضوئية بناءً على الموقع وإجراء تحليل التكلفة وتحديد جدوى المشروع.
2. جيد للطلاب وكذلك أداة مفيدة لأولئك الذين يرغبون في النظر في الاستثمار في مشاريع الطاقة الشمسية الكهروضوئية في مرحلة مبكرة.
3. سهل الاستخدام إلى حد ما نظرًا لأنه عبارة عن جدول بيانات Excel.
4. بدون تكلفة .

يعاب عليه أنه لا يوجد لديه أي تحليل التظليل، لا مجال لإضافة مصادر البيانات الأخرى أو البيانات المخصصة، لا يوجد مجال لإضافة بيانات وحدة العاكس [7]، (شكل 5) يوضح واجهة البرنامج.



شكل5. واجهة برنامج RETScreen

و. *نموذج مستشار النظام (SAM)*

نموذجًا للأداء والمال مصممًا للمساعدة في صنع القرار (مع مراعاة سياسات البيانات والطاقة الأمريكية) ، طورته وزارة الطاقة الأمريكية (DoE)والمعمل الوطني للطاقة المتجددة (NREL) [7]، (شكل 6) يوضح واجهة البرنامج.
يمتاز هذا البرنامج بالتالي :

1. يقوم برنامج SAM بتنبؤات الأداء وتكلفة الطاقة المقدرة لمشاريع الطاقة المتصلة بالشبكة استنادًا إلى تكاليف التركيب والتشغيل وبارامترات تصميم النظام التي يحددها المستخدم .
2. لديه إعدادات مسبقة لأنواع مختلفة من النماذج المالية المستخدمة في الولايات المتحدة، ويمكن للمستخدم اختيار الخيار المناسب وتقديم مدخلات لتشغيل المحاكاة وإنشاء تقارير حول التوليد والخسائر والبيانات المالية.
3. يقوم بتنزيل البيانات من قاعدة البيانات الوطنية للإشعاع الشمسي في الولايات المتحدة والتي تغطي العديد من المدن من جميع أنحاء العالم. يسمح للمستخدم بإدخال بيانات TMY2 و TMY3 وEPW .
4. قاعدة بيانات كبيرة من الوحدات والعاكسات المدرجة من قبل (CEC) هيئة كهرباء كاليفورنيا ومختبرات ساندیا الوطنية مرفقة مع البرنامج أو يمكن تنزيلها مجانًا.
5. بدون تكلفة.

يعاب عليه أنه يتطلب الكثير من الإدخال اليدوي للبيانات .

شكل 6. واجهة برنامج نموذج مستشار النظام (SAM)

ز. *Solar Pro*

تم إنشاؤه من قبل شركة لابلاس اليابانية [10] هذا هو البرنامج الوحيد في قائمة MNRE الذي يقدم عملية حساب دقيقة، مما يجعله واحدًا من البرامج الأكثر دقة والوحيدة التي توفر واجهة مستخدم تفاعلية ثلاثية الأبعاد. يقوم SOLAR PRO بحساب كمية الكهرباء المولدة بناءً على

خطوط العرض وخطوط الطول والظروف الجوية لموقع التثبيت. يؤدي هذا إلى نتائج محاكاة دقيقة[7].

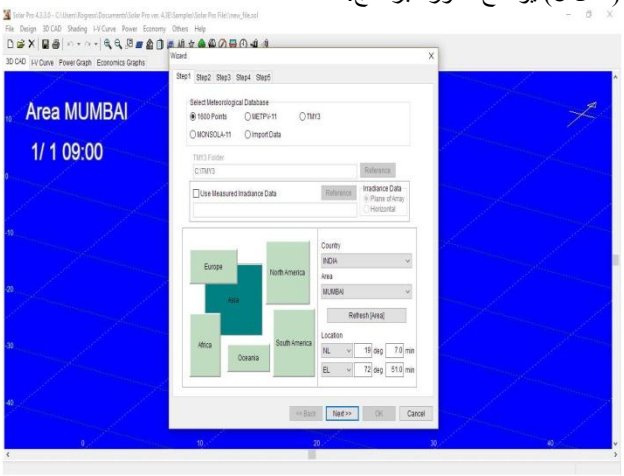
تسمح المحاكاة بما في ذلك تأثير الظل من خلال المباني والكائنات المحيطة للمستخدمين بالتحقق من الإعدادات المثلى وتصميمات الوحدات قبل تثبيت النظام.

يحسب SOLAR PRO أيضًا منحنى I-V للألواح الشمسية بدقة وسرعة بناءً على الخصائص الكهربائية لمنتج كل مصنع [11].

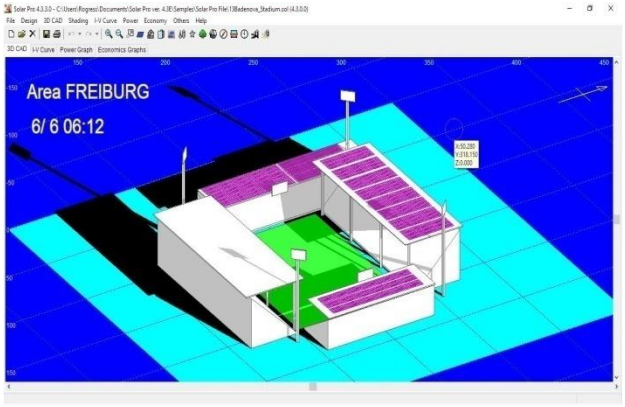
يميز هذا البرنامج النقاط التالية:

1. يقدم البرنامج مستويات عالية من الدقة في توليد الطاقة الكهروضوئية نظرًا لصيغة حسابها الفريدة الدقيقة التي تستغرق قراءة تراكمية للكيلووات بدلاً من القراءة المعتادة للكيلووات ساعة التي تستعملها معظم البرامج الأخرى .
2. يتيح تحليل مفصل تفاعلي بالقرب من التظليل، للمستخدم تحديد المناطق المحددة التي تتأثر وإجراء التغييرات اللازمة في التصميم لتحسين التوليد.
3. وظيفة Map التي تساعد في رسم تخطيط موقع بمساعدة الصور الأرضية للأقمار الصناعية.
4. واجهات المستخدم الأكثر سهولة .
5. تسمح بيئة ثلاثية الأبعاد للمستخدم ببناء البيئة المحيطة به بشكل تفاعلي عن طريق سحب وإسقاط الكائنات ثلاثية الأبعاد. تعرض الرسوم المتحركة الدقيقة تأثير التظليل على الوحدات النمطية ويمكن للمستخدمين ضبط موضع الكائنات القادمة في مسار الشمس ورؤية النتيجة على الفور في الوحدات المتضررة.
6. يأتي البرنامج مزودًا ببيانات من مئات محطات الطقس في جميع أنحاء العالم.
7. يمكن للمستخدم أيضًا اختيار إدخال Meteonorm أو Solar GISأو البيانات التي ينشئها المستخدم المحفوظة بتنسيق جدولي [11].

يكلف هذا البرنامج 1300 دولارًا أمريكيًا للإصدار التعليمي، (شكل 7) و (شكل 8) يوضح صور للبرنامج.



شكل 7. واجهة برنامج SolarPro



شكل 8. واجهة أخرى لبرنامج SolarPro

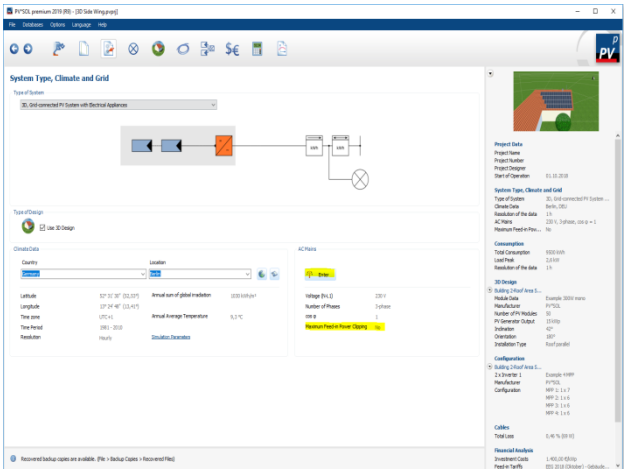
ح. *PV*SOL*

تأسست الشركة في عام 1988 من قبل Dr. Valentin في ألمانيا . وهذا البرنامج هو أول برنامج يتم إطلاقه في السوق في عام 1993، تبع ذلك الإصدار الأول من برنامج التصميم والمحاكاة للأنظمة الكهروضوئية .

يمكن تصميم ومحاكاة جميع أنواع الأنظمة الكهروضوئية الحديثة؛ من نظام الأسطح الصغيرة مع وحدات قليلة إلى الأنظمة متوسطة الحجم على الأسطح التجارية إلى الحدائق الشمسية الكبيرة - تدعمك PV * SOL premium بأدوات عديدة للتصميم والمحاكاة [11].

مميزاته :

1. إن التصور ثلاثي الأبعاد الفريد من نوعه هو أهم ما يميز PV SOL premium *. يمكنك تصور جميع الأنواع الشائعة للأنظمة ثلاثية الأبعاد، سواء كانت مدمجة في السقف أو مثبتة على السقف، سواء على الأسطح الصغيرة ذات الزوايا أو القاعات الصناعية الكبيرة أو المساحات المفتوحة - مع ما يصل إلى 7500 وحدة مركبة أو ما يصل إلى 10000 وحدة موازية للسقف.
2. حساب التظليل على أساس كائنات ثلاثية الأبعاد.
3. توفر النتائج التفصيلية معلومات حول أداء نظامك في جميع الأوقات.
4. يمكن استخدام قاعدة بيانات منتجات الشركة الشاملة في أي وقت. وهي تتضمن حاليًا أكثر من 21000 وحدة كهروضوئية ، و 5100 عاكس ، و 1900 نظام بطارية والعديد من المنتجات الأخرى مثل السيارات الكهربائية ومحسنات الأداء.
5. يتم تحديثه بانتظام من قبل مصنعي المنتجات أنفسهم ، بحيث يمكنك دائمًا العمل بأحدث البيانات.
6. يمكن إنشاء تقارير مشروع عالية الجودة، حيث يمكن تكوينها وتحريرها حسب الحاجة. كما يمكن أيضًا إنشاء مخططات الدوائر بأجهزة السلامة الضرورية [11]. التكلفة الكلية لهذا البرنامج هو2456 يورو [10]، (شكل 9) يوضح واجهة البرنامج.

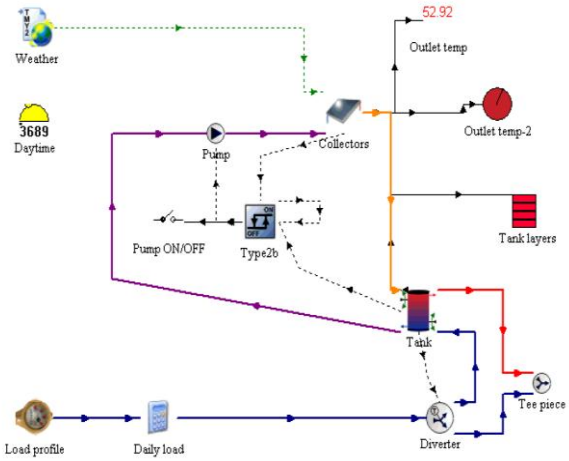


شكل 9. واجهة برنامج PV*SOL

ط. TRNSYS

TRNSYS هو برنامج محاكاة أنشأته جامعة ويسكونسن ماديسون الولايات المتحدة . يتعرف على لغة وصف النظام التي يحدد فيها المستخدم المكونات التي تشكل النظام والطريقة التي يتم توصيلها بها. تتضمن مكتبة TRNSYS العديد من المكونات الشائعة في أنظمة الطاقة الحرارية والكهربائية ، بالإضافة إلى إجراءات المكونات للتعامل مع إدخال بيانات الطقس أو وظائف التأثير الأخرى المعتمدة على الوقت وإخراج نتائج المحاكاة. تضفي الطبيعة المعيارية لـ TRNSYS مرونة هائلة على البرنامج ، وتسهل إضافة النماذج الرياضية غير المدرجة في مكتبة TRNSYS القياسية إلى البرنامج. TRNSYS مناسب تمامًا للتحليلات التفصيلية لأي نظام يعتمد سلوكه على مرور الوقت. أصبح TRNSYS برنامجًا مرجعيًا للباحثين والمهندسين حول العالم. تشمل التطبيقات الرئيسية: أنظمة الطاقة الشمسية (أنظمة الطاقة الشمسية الحرارية والفوتوفولتية) ، والمباني منخفضة الطاقة وأنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء ، وأنظمة الطاقة المتجددة ، والتوليد المشترك للطاقة ، وخلايا الوقود [12].

تم إصدار TRNSYS 18.0 في أبريل 2017. الإصدار الحالي هو 18.03.0002 تم إصداره في يناير 2021 [11]. التكلفة الجمالية لهذا البرنامج هو $2100 [10]، (شكل 10) يوضح واجهة البرنامج.

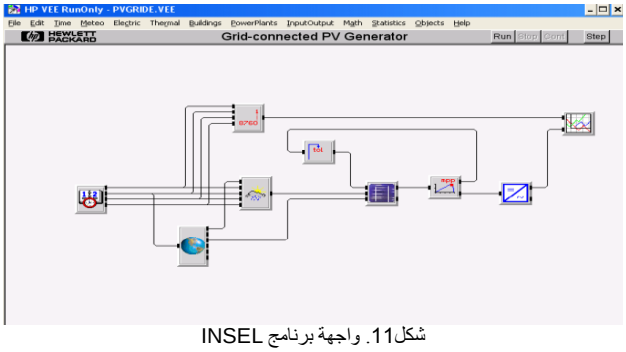


شكل 10. واجهة برنامج TRNSYS

ي. INSEL

INSEL برنامج لمحاكاة ومراقبة وتصور أنظمة الطاقة هو نظام محاكاة مخطط لبرمجة التطبيقات من قطاع الطاقة المتجددة بأكمله. تم تصميم برنامج INSEL الألماني بشكل أساسي للهندسة والشركات الأخرى التي تعمل في مشاريع طاقة كبيرة ومعقدة وهو مثالي للاستخدام في البحث والتعليم.

يقدم INSEL للمستخدمين نماذج محاكاة جاهزة لبداية سريعة. ولكن يمكن للمستخدمين تصميم نماذج جديدة تمامًا لجميع أنواع تطبيقات النظام بمساعدة محرر الرسومات INSEL المريح والقوي. بالإضافة إلى ذلك ، يوفر INSEL واجهة فريدة للتوسع في لغات البرمجة مثل Fortran و C C / ++. يمكن دمج INSEL مع جميع ميزات MATLAB و Simulink ويوفر مجموعة كبيرة من مكونات النموذج لمجموعة متنوعة من تطبيقات المحاكاة [13]. التكلفة هي 1700 يورو [10]، (شكل 11) يوضح واجهة البرنامج.



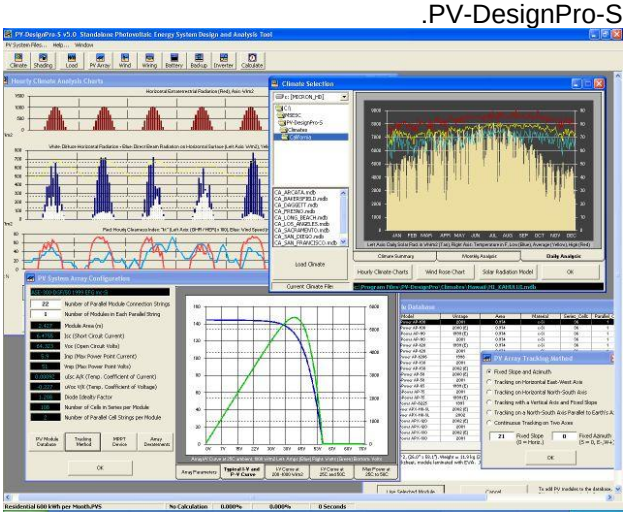
شكل11. واجهة برنامج INSEL

ك. PV-DesignPro v6.0

PV-DesignPro v6.0 عبارة عن مجموعة من البرامج مصممة لمحاكاة نظام الطاقة الكهروضوئية من قبل شركة البرمجيات هايكو ، الولايات المتحدة الأمريكية ، على أساس كل ساعة لمدة عام واحد وبناءً على تصميم مناخ ونظام يختاره المستخدم. يتم تضمين ثلاثة إصدارات من برنامج PV-DesignPro على القرص المضغوط الخاص بـ Solar Design Studio "PV-DesignPro-S" للأنظمة المستقلة مع تخزين البطارية ، و "PV-DesignPro-G" للأنظمة المتصلة بالشبكة التي لا تحتوي على بطارية تخزين ، و "PV-DesignPro-P" لأنظمة ضخ المياه.

الغرض من البرامج هو المساعدة في تصميم النظام الكهروضوئي من خلال توفير معلومات دقيقة ومتعمقة حول خرج طاقة النظام المحتمل واستهلاك الحمل ، والطاقة الاحتياطية اللازمة أثناء تشغيل النظام ، والآثار المالية لتثبيت النظام المقترح. يتم توجيه PV-DesignPro للأفراد الذين يعتبرون أنفسهم مصممي وباحثين محترفين لأنظمة الطاقة الكهروضوئية ، ولكن تم إكمالها بطريقة تجعل من الممكن للمصممين المبتدئين تقييم تصميمات النظام.

يشتمل القرص المضغوط للبرنامج على قاعدة بيانات مناخية لـ 239 موقعًا في الولايات المتحدة . يوجد أيضًا على القرص المضغوط برنامج عالمي لتوليد المناخ كل ساعة مع 2132 مناخًا دوليًا يجمع أيًا من هذه المناخيات في دقائق لاستخدامها مع البرنامج. يمكن للمستخدمين اختيار المناخيات ببساطة عن طريق تصفح الملفات المختلفة في "نافذة المناخ" . أيضًا ، يتم تقديم الإرشادات للمستخدمين لإنشاء ملفات المناخ الخاصة بهم بناءً على البيانات المتوفرة لديهم لموقع معين [14].التكلفة الاجمالية لهذا البرنامج هو $249 [10]، (شكل 12) يوضح واجهة البرنامج لإصدار PV-DesignPro-S.



شكل 12. واجهة برنامج PV-DesignPro-S

ل. PVLib

pvlib python هي أداة مدعومة توفر مجموعة من الوظائف والفئات لمحاكاة أداء أنظمة الطاقة الكهروضوئية. تم نقل pvlib python في الأصل من صندوق أدوات PVLIB MATLAB الذي تم تطويره في مختبرات ساندیا الوطنية وهو ينفذ العديد من النماذج والأساليب المطورة في المختبرات [15].

PVLib هو نتاج الجهود التعاونية لمجموعة من المتخصصين في الكهروضوئية تسمى PV PerformanceModelling Collaborative (PVPMC) ، والتي يتم تسهيلها من قبل مختبرات SandiaNational في الولايات المتحدة الأمريكية. صندوق أدوات PVLib هو مستودع معياري لنمذجة النظام الكهروضوئي وخوارزميات التحليل . حتى الآن ، لم يتم تنفيذ أي نماذج مالية ، لذا فهي مجرد حزمة برامج نماذج أداء. يستخدم صندوق أدوات PVLib البرمجة المعيارية على مستوى الكود لتنفيذ نمذجة النظام. يتوفر صندوق الأدوات بلغات MATLAB أو pythonprogramming. لا تأتي مربعات أدوات PVLib مع أي واجهات مستخدم رسومية ، لذلك من المتوقع أن يقوم المستخدم باستدعاء الوظائف ، وتعيين المعلمات المطلوبة وتنفيذ المحاكاة باستخدام الوحدات المتوفرة ككتل بناء [16].

محاكاة نموذجية في PVLib تجمع الخطوات التالية:

1. تحديد موقع وتصميم النظام الكهروضوئي. يتضمن ذلك إدخال مكتبات python والإضافات الضرورية ، وجمع بيانات الطقس للموقع المطلوب وتحديد اتجاه وحدات PVmodules أو المصفوفات.
2. يتم الحصول على بيانات الطقس من العام النموذجي للأرصاد الجوية (TMY2 و TMY3).
3. نمذجة خصائص DC (التيار المباشر) IV (الجهد الحالي). يستلزم ذلك تقدير سلوك الوحدة المختارة وفقًا لخصائصها IV الواردة في قاعدة بيانات الوحدة النمطية ، استجابة لبيانات الطقس الموضحة في الخطوة الأولى. جنبًا إلى جنب مع بعض النتائج الوسيطة ، يحصل المستخدم على عائد طاقة التيار المستمر المقدر. تحويل طاقة التيار المستمر إلى تيار متردد
4. يستخدم المستخدم وحدة PVLib التي تأخذ الخصائص التقنية للعاكس المطلوب كأحد البارمترات والنماذج لمخرج طاقة التيار المتردد.
5. يمتلك المستخدم أيضًا خيار تصدير نتائج المحاكاة للعرض التقديمي أو إجراء مزيد من التحليل في حزمة برنامج طرف ثالث.
6. الوصول إلى PVLib مجاني ويسهل تثبيت البرامج النصية نفسها.
7. الكود الخاص به مفتوح المصدر وبالتالي فهو شفاف وسهل التعديل .
8. يتيح النهج المعياري inPVLib للمستخدمين رسم تحليلات أفضل لأجزاء من سلسلة النمذجة بشكل منفصل.

بسبب معرفة القراءة والكتابة البرمجية التي تتطلبها PVLib ، فإن البرنامج يجتذب المستخدمين في الغالب من مجالات متخصصة مثل الهندسة والبحث [16].

لحصر كل الميزات والتكاليف والمؤسس لهذه البرمجيات، (جدول1) يوضح كل ذلك في مقارنة عامة بينها.

جدول 1. مقارنة للبرمجيات الرئيسية لمحاكاة المنظومات الشمسية الكهروضوئية

اسم البرنامج	المؤسسة	التكلفة	مميزات البرامج
HOMER	أسس الدكتور ليبينثال شركة HOMER Energy LLC في عام 2009	4200 دولار	• محاكاة مصادر الطاقة المتعددة. • يمكن تضمين عوامل مثل سرعة الرياح وتكلفة الوقود .
PV F-Chart	طورته كليات جامعة ويسكونسن	400 دولار	• يستهدف هذا البرنامج للأغراض الأكاديمية. • أساسي ومفيد للغاية للحساب عند إدخال البيانات يدويًا لكل مخطط. • بيانات الطقس لأكثر من 300 موقع وأيضا يمكن إضافة بيانات طقس لمواقع جديدة. • تنفيذ سريع للغاية
PVPLANNER	يأتي هذا البرنامج من مزود قاعدة بيانات الموارد الشمسية SolarGis	1700 دولار	• إنشاء تقرير بـ 14 لغة. • يقوم تلقائيًا بحساب تقليل التضاريس. • سمح خرائط الموارد الشمسية التفاعلية عالية الدقة (iMaps)للمستخدمين بتحديد الموقع بدقة.
PVSYST	تطوير هذا البرنامج بواسطة الفيزيائي السويسري Andre Mermoud والمهندس الكهربائيMichel Villoz	1040 دولار	• من السمات الرئيسية لهذا البرنامج التقرير السريع للإنتاج في مرحلة تخطيط المشروع ، والدراسة التفصيلية ، والتحجيم ، والتقرير بالساعة ، وإعداد التقارير . • قدرته على التعامل مع تحليل الظل.
RETScreen	تم تطويره بواسطة National Resources Canada	مجاني	• برنامج مجاني يتكون من جدول بيانات يستخدم لحساب أنواع مختلفة من مصادر الطاقة بما في ذلك الطاقة الشمسية الكهروضوئية ويسمح للمستخدم بحساب توليد الطاقة الكهروضوئية بناءً على الموقع وإجراء تحليل التكلفة وتحديد جدوى المشروع. • جيد للمذاب وأداة مفيدة لأولئك الذين قد يرغبون في النظر في الاستثمار العائد على مشروع الطاقة الشمسية الكهروضوئية في مرحلة مبكرة.
نموذج مستشار النظام (SAM)	طورته وزارة الطاقة الأمريكية (DoE)والمعمل الوطني للطاقة المتجددة(NREL) .	مجاني	• أتيه إعدادات مسبقة لأنواع مختلفة من النماذج المالية المستخدمة في الولايات المتحدة ويمكن للمستخدم اختيار الخيار المناسب وتقديم مدخلات لتشغيل المحاكاة وإنشاء تقارير حول التوليد والخسائر والبيانات المالية.
SolarPro	تم إنشاؤه من قبل شركة لابلاس البيانية	1900دولار	• تقدم مستويات عالية من الدقة في توليد الطاقة الكهروضوئية • واحدة من واجهات المستخدم الأكثر سهولة يتيح تحليل مفصل لمناطق بالقرب من التظليل. • يأتي البرنامج مزودًا ببيانات من مئات محطات الطقس في جميع أنحاء العالم.
PV*SOL	تأسست الشركة في عام 1988 من قبل Dr. Valentin في ألمانيا	2456 يورو	• إن التصور ثلاثي الأبعاد الفريد من نوعه هو أهم ما يميز * PV SOL premium. • حساب التظليل على أساس كائنات ثلاثية الأبعاد. • توفر النتائج التفصيلية معلومات حول أداء نظامك في جميع الأوقات. • يتم تحديثه بانتظام من قبل مصنعي المنتجات أنفسهم، بحيث يمكنك دائمًا العمل بأحدث البيانات.
TRNSYS	إنشائه جامعة ويسكونسن ماديسون الولايات المتحدة	2100 دولار	• تتضمن مكتبة TRNSYS العديد من المكونات الشائعة في أنظمة الطاقة الحرارية والكهربائية. • تعامل مع إدخال بيانات الطقس. • مرونة هائلة • إضافة النماذج الرياضية غير المدرجة في مكتبة TRNSY • برنامجًا مرجعيًا للباحثين والمهندسين حول العالم.
INSEL	شركة INSEL الالمانية	1700 يورو	• تقدم INSEL للمستخدمين نماذج محكمة جاهزة للبناية سريعة • يمكن للمستخدمين تصميم نماذج جديدة • يوفر INSEL واجهة فريدة لتوسيع في لغات البرمجة مثل Fortran و C / C ++. يمكن دمج INSEL مع جميع ميزات MATLAB و Simulink وتوفر مجموعة كبيرة من مكونات النموذج لمجموعة متنوعة من تطبيقات المحاكة.
PV-DesignPro v6.0	شركة البرمجيات هايكو، الولايات المتحدة الأمريكية	249 دولار	• الغرض من البرامج هو المساعدة في تصميم النظام الكهروضوئي من خلال توفير معلومات دقيقة ومتعمقة حول خرج طاقة النظام المحتمل واستهلاك الحمل ، والطاقة الاحتياطية اللازمة أثناء تشغيل النظام. • يوجد أيضًا على القرص المضغوط برنامج عالمي لتوليد المناخ كل ساعة مع 2132 مناخًا دوليًا. • يتم تقديم الإرشادات للمستخدمين لإنشاء ملفات المناخ الخاصة بهم بناءً على البيانات المتوفرة لديهم لموقع معين.
PVLib	تم تطويره في مختبرات ساندیا الوطنية	مجاني	• الوصول إلى PVLib مجاني ويسهل تثبيت البرامج النصية نفسها. • الكود الخاص به مفتوح المصدر وبالتالي فهو شفاف وسهل التعديل. • يتيح النهج المعياري inPVLib للمستخدمين رسم تحليلات أفضل لأجزاء من سلسلة النمذجة بشكل منفصل. • بسبب معرفة القراءة والكتابة البرمجية التي تتطلبها PVLib ، فإن البرنامج يجتذب المستخدمين في الغالب من مجالات متخصصة مثل الهندسة والبحث.

3. مقارنة بين برنامج PVsyst و PV*SOL

أ. P*VSOL

PV*SOL هو البرنامج الرائد المستخدم من قبل المخططين والمهندسين المعماريين والفنيين في جميع أنحاء العالم لتخطيط وتصميم أنظمة الكهروضوئية الفعالة [17].

ب. PVsyst

تم تطويرها في الأصل في جامعة جنيف ولكنها الآن PV هي أداة محاكاة تتمحور حول PVsyst شركة مستقلة، تركز حزمة البرامج على نمذجة وتحجيم ومحاكاة وتحليل الأنظمة الكهروضوئية[16]. المقارنة بين البرنامجين يلخصه (جدول 2).

جدول 2. مقارنة بين برنامج PVsyst وPV*SOL

وجه المقارنة	Pvsyst	PV*sol
اللغه	واجهته متعددة اللغات مثل الألمانية والفرنسية والإسبانية والإيطالية ، بالإضافة إلى اللغة الإنجليزية.	عند تثبيت البرنامج يمكنك اختيار اللغة المتاحة: الإنجليزية ،الإيطالية ،البرتغالية.
التكلفه	يوفر PVSyst نسخة مجانية لمدة 30 يومًا ، بعد ذلك يتعين عليك شراءه بتكلفة 1040 دولار ، كما يقدم PVSyst خصومات الأكاديميين والمدارس والجامعات والمعاهد التعليمية على التراخيص المشتراة لأغراض التعليمية.	التكلفة 1900 دولار ويمكن استخدامه مجاني عن طريق الانترنت.
التقارير والتحليل	يوفق نتائج المحاكاة في التقارير يمكن أيضًا عرض النتائج على شكل جداول أو تصديرها إلى حزمة برامج تابعة لجهة خارجية مثل مايكروسفت اكسل	يوفر البرنامج تقرير المشروع ب22 لغة والعديد من المتغيرات والقوالب المتاحة وتصدير جميع النتائج بسهولة كملف Word أوPDF .
سهولة الاستخدام	يحتوي PVSyst على واجهة مستخدم رسومية تجعل المستخدمين قليلي الخبرة في بناء أنظمة PV خاصة بهم ، وإجراء عمليات المحاكاة الأساسية كما توفر واجهة PVSyst للمستخدم تصميم النظام وتجميعه والحصول على نتائج رسومية بسهولة ، يتعين على المستخدم فقط إدخال بعض القيم المطلوبة في الحقول المناسبة ثم تنفيذ الإجراءات	يوفر برنامج PV*sol واجهة ثلاثية الأبعاد وتحليل ظلي للأجسام ثلاثي الأبعاد مما يسهل استخدامها ويعطي تحاليل عالية الدقة.
القدرة على النمذجة الاقتصاديه	يقدم نظام PVSyst تقييما اقتصاديا لنمذجة تكاليف المشاريع والاستثمارات. باستخدام النموذج المالي، يمكن للمستخدم توقع تكاليف التشغيل واستنتاج القدرة على المدى الطويل ، خاصة بالنسبة للنظام المتصل بالشبكة.	تحليل اقتصادي مفصل. خيارات تناسب احتياجات مختلف البلدان.

الخلاصة

هناك عدد لا بأس به من برامج المحاكاة الخاصة بالمنظومات الشمسية الكهروضوئية، والتي يمكنها بالإضافة إلى محاكاة وتصميم هذه المنظومات؛ تقديم التقييم الاقتصادي، والتحليل والتخطيط، والرصد والتحكم، وخريطة الإشعاع الشمسي، ويمكن بعضها أيضا المحاكاة عبر الإنترنت. تتوفر جميع برامج المحاكاة التي تمت مناقشتها لأغراض تجارية وتعليمية، وبعضها مجاني والأخر يحتاج إلى دفع بعض الرسوم لاستخدامها. يمكن تحديث جميع هذه البرامج عن طريق مواقع الانترنت الخاصة بها. قد تم تصميم هذه البرامج بأهداف مختلفة يجب أن تأخذ في الاعتبار عن استخدامها، ولذلك لديها بعض القيود لحل مشكلات محددة و معينة. جميع البرامج التي تمت مناقشتها تستخدم في مجال أو تطبيق أو تخصص محدد خاص بالأنظمة الكهروضوئية. ستساعد هذه الورقة المستخدم على اختيار برنامج المحاكاة الأفضل والدقيق لأداء وظيفة معينة. من خلال المقارنة المذكورة في هذه الورقة وكذلك من الاستخدام والتحليل، نجد أن برنامج PVsyst هو الأسهل والأشهر، بينما الأقوى والأفضل في محاكاة المنظومة الكهروضوئية هو برنامج PV*SOL ولكن ما يعاب هذا البرنامج صعوبة الاستخدام.

المراجع

[1] Nallapaneni M. K. "*Simulation Tools For Technical Sizing And Analysis Of Solar Pv Systems*" 6th World Conference On Applied Sciences, Engineering & Technology,26-27 August 2017, Umpo, Indonesia.

[2] Ali N. S., Hashim H. A., Mustafa D. F. "*Stand-Alone Solar Power Systems Designed for Office*" Journal of Xi'an University of Architecture & Technology Volume XII, Issue III, 2020 Issn No : 1006-7930

[3] I.A. Odigwe* , C.I. Nnadi*, A.F. Agbetuyi*, A.A. Awelewa*, F.E. Idachaba Development of a software solution for solar-PV power systems sizing and monitoring, International Journal of Renewable Energy Research 3(3):698-706 August 2013.

[4] A. Bhatia "*Design and Sizing of Solar Photovoltaic Systems*" Continuing Education and Development, Inc. An Online Continuing Education Provider for Professional Engineers. CED enginnering.com.

[5] Sharma D. K., Verma V. and Singh A. P. "*Review and Analysis of Solar Photovoltaic Softwares* " International Journal of Current Engineering and Technology. Available online 01 April 2014, Vol.4, No.2 (April 2014).

[6] Lambe M. A., Olalekan O., and Mustapha M. "Web-based software application design for solar PV system sizing" Article in TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control) · December 2021 DOI: 10.12928/telkomnika.v19i6.21666.

[7] https://www.electrobrahim.com/2019/10/7.html (تم الولوج إلى الموقع بتاريخ 2021/07/07).

[8] DS new energy. http://ar.dsnsolar.com/info/7-most-popular-solar-pv-system-design-and-simu-34918282.html (تم الولوج إلى الموقع بتاريخ 2021/07/07).

[9] F-Chart https://fchartsoftware.com/pvfchart/ ,Copyright © 2021 F-Chart Software, LLC. (2021/07/16 تم الولوج إلى الموقع بتاريخ).

[10] Mahendra L., Kothari D. P., Mool S., **"***Investigation of Solar Photovoltaic Simulation Softwares*", January 2010.

[11] Valentin Software. https://valentin-software.com/en/products/pvsol-premium/ (تم الولوج إلى الموقع بتاريخ 2021/07/15).

[12] A TRaNsient SYstems Simulation Program 2017. https://sel.me.wisc.edu/trnsys/features/features.html (تم الولوج إلى الموقع بتاريخ 2021/07/14).

[13] INSEL8 Software for simulation, monitoring, and visualization of energy systems. https://www.insel.eu/en/what-is-insel.html (تم الولوج إلى الموقع بتاريخ 2021/07/15).

[14] Maui solar energy software. http://www.mauisolarsoftware.com/(تم الولوج إلى الموقع بتاريخ 2021/07/15).

[15] PVlib python. https://pvlib-python.readthedocs.io/en/stable/ (تم الولوج إلى الموقع بتاريخ 2021/07/16).

[16] Gurupira T. and Rix A.J.," Pv Simulation Software Comparisons: Pvsyst, Nrel Sam And Pvlib", January 2017.

[17] BLUESOL. Photovoltaic design software. http://www.bluesolpv.com/dnnsite/default.aspx?gclid=Cj0KCQjw_8mHBhClARIsABfFgphGkkx489YFGZrry0lgbiiweqqHF2zmHfJOQ8dQ-RTzxKO5oFGBW1oaAhpdEALw_wcB (تم الولوج إلى الموقع بتاريخ 2021/07/07).