

## افزایش تاب آوری سایت‌های مخابراتی با استفاده از کنترل هوشمند مولد خورشیدی بهینه شده تحت شرایط دما و تابش متغیر

هادی عزیزی منفرد<sup>۱\*</sup>، محمد قنبری صباغ<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکترا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمین، ۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال  
(دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۷؛ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۰)

### چکیده

مولد خورشیدی در سامانه‌های مرتبط با پدافند نوین کاربردهای زیادی دارد. یک نوع کاربرد مهم و اساسی این نوع مولد تأمین انرژی پایدار برای سایت‌های مخابراتی و افزایش تاب آوری آن‌ها در هنگام حوادث و بحران‌های مختلف است. استفاده از مولد خورشیدی بهینه و کنترل شده تحت شرایط محیطی متغیر و در راستای افزایش تاب آوری سایت‌های مخابراتی از اهداف اصلی این تحقیق است. بنابراین تحت شرایط دما و تابش متغیر نقطه حداکثر توان مشخصه مولد خورشیدی با هدف افزایش راندمان، ردیابی و کنترل می‌شود. در این تحقیق از روش برنامه‌نویسی پویا (DPM) با تلفیق الگوریتم ایجاد اغتشاش و مشاهده (P&O) و الگوریتم عددی معروف (نیوتن - رافسون) استفاده شده است. به روش برنامه‌نویسی پویا و بر اساس داده‌های به‌دست آمده از اندازه‌گیری تحت شرایط دما و تابش متغیر تحلیل انجام شده، سپس تصمیم هوشمند گرفته می‌شود. راندمان به‌دست آمده با کارهای تحقیقی دیگر مقایسه شده که مقدار راندمان به‌دست آمده در این مقاله از همه بیشتر است. کمیت‌ها و پارامترها به دو روش شبیه‌سازی با متلب و اندازه‌گیری عملی به‌دست آمده که به‌صورت نمودار و جدول ارائه شده‌اند. درصد خطای نسبی ردیابی نقطه حداکثر توان مشخصه مولد خورشیدی بسیار کوچک است.

**کلیدواژه‌ها:** تاب آوری سایت‌های مخابراتی، کنترل هوشمند مولد خورشیدی، افزایش راندمان، ردیابی نقطه حداکثر توان مولد

## Increasing the Resilience of Telecommunication Sites by Intelligent Control of the Optimized Solar Generators under Variable Temperature and Radiation Conditions

H. Azizi-Monfared\*, M. Ghanbari Sabagh

Islamic Azad University, Khomein Branch

(Received: 06/04/2022; Accepted: 11/08/2022)

### Abstract

Solar generators have many applications in the field of modern defense systems. An important and fundamental application of this type of generator is to provide sustainable energy for telecommunication sites as well as increase their resilience during various accidents and crises. The use of optimal and controlled solar generators under variable environmental conditions in order to increase the resilience of telecommunication sites is one of the main objectives of this research. Therefore, under variable temperature and radiation conditions the maximum power point characteristic of the solar generator is tracked and controlled with the aim of increasing efficiency. In this research, the dynamic programming method (DPM) is used by combining the perturbation and observation (P&O) algorithm and the famous Newton-Raphson numerical algorithm. The analysis is performed by the dynamic programming method, based on the data obtained from the measurement under variable temperature and radiation conditions, and then an intelligent decision is made. The efficiency obtained in this article has been compared with the other research works and shown to be the highest. Quantities and parameters have been obtained through both MATLAB simulations and practical measurements, and presented in the form of figures and tables. The percentage of relative error in tracking the maximum power point characteristic of the solar generator is very small.

**Keywords:** Resilience of Telecommunication Sites, Intelligent Control of Solar Generator, Increasing Efficiency, Maximum Power Point Tracking of Generator

## ۱. مقدمه

هزینه عملیات خواهد شد، در این روش از برنامه‌نویسی پویا (DP<sup>۶</sup>) استفاده شده است [۳]. طراحی و کنترل خروجی مولد خورشیدی با اهداف پایداری خروجی و افزایش راندمان با ردیابی و کنترل نقطه حداکثر توان مولد خورشیدی و با استفاده از الگوریتم کلاسیک و به‌کارگیری مبدل جریان مستقیم با هدف کنترل سطح ولتاژ خروجی، در این روش یک ماشین الکتریکی جریان مستقیم به‌عنوان بار مصرفی فرض شده است [۴].

کنترل یک سامانه غیر خطی شامل پمپ آب و مولد خورشیدی در مناطق دور افتاده از شبکه برق سراسری و تغذیه پمپ آب الکتریکی با استفاده از انرژی مولد خورشیدی به‌صورت مستقل و به دلیل در دسترس نبودن شبکه برق سراسری، در این طرح ردیابی نقطه حداکثر توان نیز مورد نظر بوده و از روش خطی سازی بازخورد حالت (ورودی - خروجی) استفاده شده است. همچنین از مبدل نوع جریان مستقیم با هدف کنترل سطح ولتاژ خروجی نیز استفاده می‌شود. در این مقاله فقط یک شرایط دما و تابش مورد نظر بوده است [۵]. کنترل بازخورد بر اساس مقایسه مقدار خروجی مولد خورشیدی با مقدار مرجع با هدف به حداقل رساندن انحراف خروجی از مقدار مورد نظر و استفاده از مبدل جریان مستقیم با هدف کنترل میزان ولتاژ خروجی و هم‌زمان ردیابی و کنترل نقطه حداکثر توان تحت شرایط مختلف دما و تابش نور خورشید نیز انجام شده است. اهداف نهایی کنترل خروجی و افزایش راندمان مولد خورشیدی است. در این روش از مدل‌سازی ریاضی مناسب و از معادلات فضای حالت نیز استفاده شده است [۶].

تحقیق و بررسی عملکرد و کارایی تولید انرژی الکتریکی و حرارتی هم‌زمان از نور خورشید با استفاده از ردیابی و کنترل جهت تابش نور خورشید با هدف متمرکز کردن نور خورشید، برای ردیابی و کنترل جهت و شدت تابش نور خورشید از متمرکز کننده‌های نور (Concentrator) استفاده شده است. در این طرح به‌صورت ترکیبی و هم‌زمان انرژی الکتریکی و حرارتی حاصل از تابش نور خورشید تولید می‌شود [۷].

تحقیق در خصوص میزان رشد و توسعه فناوری و بهبود سرمایه‌گذاری در حوزه‌های انرژی تجدیدپذیر شامل مولد خورشیدی، توربین‌های بادی، خازن‌ها و باتری‌ها در یک دوره زمانی معین یک مسئله مهم در حوزه‌های مرتبط به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر است. میزان رشد و توسعه فناوری و میزان رشد سرمایه‌گذاری در این حوزه‌ها قابل توجه است. در این طرح تحقیقی، اطلاعات میدانی جمع‌آوری شده در خصوص چهار حوزه فوق به‌صورت نمودار و جدول ارائه شده و جمع‌بندی بر اساس این اطلاعات عبارت است از: میزان بهبود سرمایه‌گذاری و رشد فناوری در حوزه مولد خورشیدی حدود ۹ درصد، میزان بهبود

در قرن جاری استفاده از مولد خورشیدی در کنار عناصر ذخیره ساز و دیگر منابع به‌عنوان تأمین کننده انرژی سامانه‌های مرتبط با پدافند نوین مثل ماهواره‌های مخابراتی و سایت‌های مخابراتی زمینی اهمیت بالایی دارا است. با هدف تأمین انرژی پایدار و افزایش تاب آوری سایت‌های مخابراتی می‌توان از مولد خورشیدی در کنار عنصر ذخیره سازی مثل باتری و دیگر منابع انرژی استفاده نمود. به خصوص سایت‌های مخابراتی مستقر در مناطق جغرافیایی مختلف که به شبکه برق سراسری دسترسی ندارند، سایت‌های مخابراتی سیار و سایت‌های مخابراتی که به شبکه برق سراسری متصل هستند اما به دلیل احتمال وقوع حوادث و بحران‌های مختلف ممکن است برق شبکه برای مدت زمانی بیشتر از زمان معمولی قطع شود. بر اساس تحقیق انجام شده در چند محور مهم از جمله استفاده از مولد خورشیدی برای تأمین انرژی پایدار برای مصارف مختلف در کنار عناصر ذخیره کننده انرژی مثل باتری و دیگر منابع انرژی، کنترل پایداری خروجی مولد خورشیدی و افزایش راندمان آن کارهای تحقیقاتی زیادی انجام شده است. در خصوص این محورها نظرهای متفاوت در ارائه روش‌ها و روش‌های گوناگون وجود دارند. در ادامه بخشی از این تحقیقات انجام شده به‌صورت خلاصه و مختصر ارائه می‌گردد. در ادامه این بخش از مقاله با تشریح مفصل روش پیشنهادی در این تحقیق با مقاله‌های مرجع ارائه شده نیز مقایسه انجام می‌شود.

ردیابی نقطه حداکثر توان (MPPT<sup>۱</sup>) با استفاده از الگوریتم ایجاد اغتشاش و مشاهده (P&O<sup>۲</sup>) و از یک مبدل ولتاژ از نوع افزایشی با هدف تثبیت ولتاژ خروجی مولد خورشیدی استفاده می‌شود. با توجه به تغییرات محیط پیرامون مولد خورشیدی این روش دارای دقت کافی در کنترل توان مولد خورشیدی است. از این الگوریتم به‌صورت گسترده در تولید محصولات تجاری استفاده می‌شود، استفاده به این دلیل است که الگوریتم (P&O) می‌تواند در کنترل سامانه‌های دیجیتال ارزان قیمت با اطمینان از کارایی بالا و خوب به‌کار برده شود [۱]. کنترل سامانه‌ای مرکب از مولد خورشیدی، باتری ذخیره ساز و مولد انرژی باد، در این طرح به‌صورت سامانه مستقل کنترل می‌شود، مشکلات پایداری ولتاژ و توان خروجی سامانه با استفاده از کنترل عرض پالس (PWM<sup>۳</sup>) می‌باشد. مبدل ولتاژ (VSC<sup>۴</sup>) و سامانه ذخیره سازی انرژی الکتریکی مطلوب (BESS<sup>۵</sup>) حل می‌شوند [۲]. با استفاده از سامانه ترکیبی شامل مولد خورشیدی، دیزل ژنراتور و باتری ذخیره ساز با اهداف تأمین انرژی پایدار مورد تقاضای بار و نیز افزایش راندمان سامانه مدیریت مطلوب انجام می‌شود. درنهایت موجب کاهش

<sup>۱</sup> Maximum Power Point Traking

<sup>۲</sup> Perturbation and Observation

<sup>۳</sup> Pulse Width Modulation

<sup>۴</sup> Voltage Source Converter

<sup>۵</sup> Battery Energy Storage System

<sup>۶</sup> Dynamic Programming

برای کنترل و افزایش راندمان طراحی شده است. در این طرح بر اساس حق تقدم یک یا چند مولد در شبکه قرار می‌گیرند، کنترل تقاضای بار شبکه و کنترل توان مولدها به صورت هم‌زمان و خودکار انجام می‌شود [۱۲].

روش مدیریت انرژی (EM<sup>۴</sup>)، کنترل میزان تقاضای بار و توان تولیدی با هدف برقراری تعادل بین توان تولیدی مولد خورشیدی و میزان تقاضای بار است. در این روش پیشنهادی با کاهش نسبت حداکثر توان تولیدی به توان متوسط تولیدی مولد خورشیدی داده شده است که موجب پایداری توان تحویل شده توسط مولد خورشیدی به بار می‌شود. به بیان دیگر زمانی که تابش خورشید به توان تولیدی مولد خورشیدی زیاد است، بخشی از توان تولیدی به بار تحویل شده و بخش اضافه توان ذخیره می‌گردد و در زمانی که تابش خورشید کم است مازاد تقاضای بار از انرژی ذخیره شده در باتری‌ها تأمین می‌شود. در این تحقیق از چند شرایط دما و تابش مختلف استفاده شده است [۱۳].

روش‌های محاسبه و به‌دست آوردن پارامترهای سلول خورشیدی نقش مهم و اساسی در کنترل و بهینه‌سازی یک مولد خورشیدی دارند. در این تحقیق بر اساس مقادیر پارامترهای سلول خورشیدی شبیه‌سازی، ارزیابی و بهینه‌سازی انجام شده است. خطای محاسبه پارامترهای سلول خورشیدی قابل قبول است [۱۴]. تجزیه و تحلیل پایداری ریزشکته جریان مستقیم با یک پارچه سازی منابع تجدیدپذیر شامل انرژی تولیدی حاصل از ترمز نمودن قطارها در یک ایستگاه راه آهن هوشمند و انرژی تولیدی حاصل از پنل‌های خورشیدی است. در این تحقیق از دو نوع ذخیره ساز انرژی شامل باتری و ابر خازن نیز استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده رفتار مورد انتظار با استفاده از قوانین کنترل غیر خطی پیشنهادی در این تحقیق است [۱۵].

با استناد به ارجاعات داده شده در این تحقیق، مشاهده می‌شود که با وجود وجه اشتراک در بعضی از روش‌ها، هر مقاله روش خاص خود را دارد. در این تحقیق نیز وجه اشتراک‌هایی با ارجاعات ارائه شده دارد اما در کل روش پیشنهادی در این تحقیق منحصر به فرد است. در این مقاله از برنامه‌نویسی پویا با تلفیق الگوریتم ایجاد اغتشاش و مشاهده و الگوریتم معروف (نیوتن - رافسون) استفاده شده است. روش پیشنهادی در این تحقیق یک فرآیند چند مرحله‌ای است که در ادامه این مراحل توضیح داده می‌شوند. اولین مرحله فرآیند اندازه‌گیری کمیت‌هاست که به صورت پویا تحت هر شرایط دما و تابش اندازه‌گیری شده و برای استفاده در مرحله بعدی ذخیره می‌شوند. در مرحله دوم با استفاده از داده‌های ذخیره شده در مرحله اول و با استفاده از الگوریتم عددی معروف (نیوتن - رافسون) و تحت هر شرایط دما و تابش

سرمایه‌گذاری و رشد فناوری در حوزه باتری‌ها ۲/۹ درصد، میزان بهبود سرمایه‌گذاری و رشد فناوری در حوزه خازن‌ها ۲/۱ درصد، میزان بهبود سرمایه‌گذاری و رشد فناوری در حوزه توربین‌های بادی ۲/۹ درصد است [۸]. فناوری برای راه‌حل‌های قابل اطمینان تأمین انرژی الکتریکی همراه با ذخیره و تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر با استفاده از سازوکار خودکار و پویا بر اساس تقدم در انتخاب منابع تأمین کننده انرژی برای تقاضای بارهای الکتریکی، میزان تقاضای بارهای الکتریکی تحت کنترل قرار دارند. منابع می‌توانند به صورت جزیره‌ای عمل کنند و یا به شبکه برق متصل شوند، منابع انرژی الکتریکی شامل یک واحد سلول سوختی ۱/۲ مگاواتی، یک مولد خورشیدی ۱/۲ مگاواتی و دو عدد دیزل ژنراتور که هر کدام با توان ۱/۲ مگاوات است، می‌باشند. روشن و یا خاموش کردن این منابع به صورت خودکار تحت کنترل قرار می‌گیرند [۹].

یک روش جدید برنامه‌ریزی پویا و استفاده از هوش رایانه‌ای برای مدیریت انرژی الکتریکی در واحدهای مسکونی و بر اساس تأمین انرژی از منابع تجدیدپذیر مانند مولدهای خورشیدی همراه با بهینه‌سازی سامانه و ذخیره سازی انرژی الکتریکی ارائه شده است که در این طرح هزینه تمام شده برای مصرف کننده نیز از اهداف مهم بهینه سازی در نظر گرفته شده است [۱۰].

بهینه سازی و هم‌زمان اتصال مولد خورشیدی به یک شبکه برق کوچک جریان مستقیم و در نهایت قابلیت اتصال به شبکه اصلی برق، محدودیت برای اتصال مولدهای خورشیدی به شبکه برق اصلی است و این محدودیت به دلیل متغیر بودن پارامترهای این مولدها تحت تأثیر تغییرات شرایط محیط پیرامون آن‌ها است. با هدف غلبه بر این چالش و اطمینان از حل شدن این مشکلات نیازمند به سامانه‌های قابل اعتماد و انعطاف پذیر خواهید بود. راه‌حل ارائه شده در این طرح عبارت است از اتصال آرایه‌های مولد خورشیدی به یک شبکه کوچک برق جریان مستقیم (DC) برای تأمین انرژی بارهای محلی و ذخیره سازی در منابع ذخیره ساز و در نهایت قابلیت اتصال این شبکه کوچک به شبکه اصلی برق با استفاده از یک مبدل جریان مستقیم خواهد بود [۱۱].

مدیریت شبکه برق کشتی‌های تمام الکتریکی بر اساس تولید انرژی الکتریکی تجدیدپذیر با استفاده از روش و استراتژی کنترلی پیش‌بینی مدل (MPCS<sup>۱</sup>) می‌باشد. در این طرح با وجودی که شبکه برق خیلی کوچکی است، اما از جهت الگو بودن این روش دارای اهمیت بالایی است. در این طرح یک سامانه قدرت مجتمع (IPS<sup>۲</sup>) شامل سلول‌های سوختی (FC<sup>۳</sup>) و پنل‌های مولد خورشیدی (PV) و دو دستگاه دیزل ژنراتور ارائه شده است. الگوریتم MPCS

<sup>1</sup> Model Predictive Control Strategy

<sup>2</sup> Integrated Power System

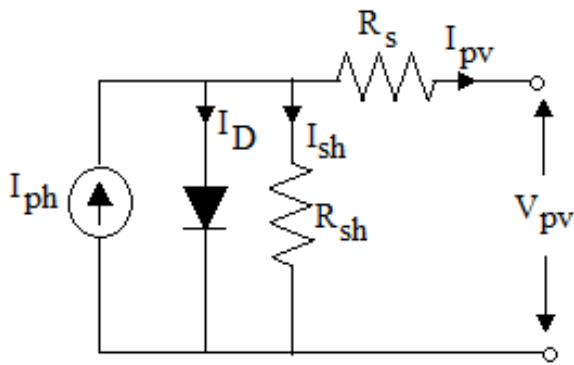
<sup>3</sup> Fuel Cells

## ۲. روش تحقیق

سؤال تحقیق این است که چگونه می‌توان با استفاده از کنترل هوشمند مولد خورشیدی بهینه شده، تحت شرایط دما و تابش متغیر، انرژی پایدار مورد نیاز سایت‌های مخابراتی مستقر در مناطق جغرافیایی مختلف (دما و تابش متغیر) تأمین شده و تاب آوری آن‌ها در هنگام حوادث و بحران‌ها افزایش داده شود؟

### ۲-۱. مدار مدل سلول خورشیدی (PV)

شکل (۱) مدار معادل یک سلول خورشیدی را نمایش می‌دهد که شامل مقاومت‌های الکتریکی سری (RS) و موازی (Rsh) است. مقدار مقاومت الکتریکی موازی نسبت به مقدار مقاومت الکتریکی سری خیلی بزرگ‌تر است. در این مدار I<sub>ph</sub> نمایش جریان تابشی است. ID نمایش جریان دیود است. Ish نمایش جریان الکتریکی شاخه موازی است. IP نمایش جریان خروجی سلول و VP نمایش ولتاژ خروجی سلول خورشیدی است. در کل این مقاله واحد اندازه‌گیری تمام جریان‌های الکتریکی آمپر (A)، واحد اندازه‌گیری تمام ولتاژها ولت (V)، واحد اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی اهم (Ω) و واحد اندازه‌گیری توان الکتریکی وات (W) است [۱۶].



شکل ۱. مدل مداری سلول PV

### ۲-۲. بلوک دیاگرام سامانه مورد مطالعه

شکل (۲) به صورت ساده بلوک دیاگرام سامانه مورد مطالعه در این تحقیق را نمایش می‌دهد. هر بخش از این بلوک دیاگرام با نام مشخص، یک قسمت از سامانه به هم پیوسته را نشان می‌دهد. مولد خورشیدی که از پنل‌های خورشیدی تشکیل می‌شود با نماد پنل (PV) نمایش داده شده است. این نماد پنل خورشیدی توسط دو خط به صورت موازی به مبدل جریان مستقیم با نام و نماد اختصاری (DC-DC Converter) و همچنین به کنترل کننده نقطه حداکثر توان مولد خورشیدی (MPPT Controller) متصل شده است. خط فلش داری که از بلوک کنترل کننده به بلوک مبدل جریان مستقیم متصل است نماد فرمان کنترل مطلوب مبدل جریان مستقیم است. دو خط فلش داری که از پنل‌های خورشیدی به بلوک با نام و نماد اختصاری (MPPT Controller) متصل هستند نماد اندازه‌گیری برخط کمیت‌های مطلوب هستند.

پارامترهای سلول خورشیدی محاسبه و ذخیره می‌شوند. در مرحله سوم با استفاده از داده‌های ذخیره شده در مرحله دوم و با روش ابتکاری در برنامه‌نویسی (کد نویسی) و به‌کارگیری خواص ماتریس‌ها در متلب و با تلفیق الگوریتم ایجاد اغتشاش و مشاهده (اجرای الگوریتم ایجاد اغتشاش و مشاهده با استفاده از برنامه‌نویسی در متلب) نقطه حداکثر توان مشخصه مولد خورشیدی به صورت پویا و برای هر شرایط دما و تابش ردیابی و ذخیره می‌شود. اختلاف مقدار به‌دست آمده نقطه حداکثر توان مشخصه مولد خورشیدی با مقدار واقعی بسیار کوچک و در حد صفر است. در آخرین مرحله فرآیند با استفاده از تابع کنترلی و به روش کنترل عرض پالس و با به‌کارگیری مبدل جریان مستقیم، ولتاژ خروجی برای تمام شرایط دما و تابش بر روی یک مقدار ثابت تثبیت می‌گردد. بنابراین برای هر شرایط دما و تابش، حداکثر توان تولیدی مولد خورشیدی به بار خروجی انتقال می‌یابد.

در ادامه به مقایسه روش پیشنهادی در این تحقیق با پیشینه موضوع پرداخته می‌شود.

۱- روش پیشنهادی یک روش تلفیقی جدید است که از ابتکار و خلاقیت جدید استفاده شده است و ابتکار به‌کار رفته در برنامه‌نویسی و استفاده از خواص ماتریس‌ها در متلب منحصر به فرد است و در هیچ‌کدام از مقاله‌های مرجع ارائه شده به این شکل و با این ترکیب استفاده نشده است.

۲- در هیچ یک از ارجاعات ارائه شده در این تحقیق مقدار واقعی کمیت‌ها و پارامترها ارائه نشده اما در این مقاله مقادیر واقعی برای هر شرایط دما و تابش ارائه شده است. مقدار واقعی کمیت‌ها و پارامترها تحت هر شرایط دمایی و تابشی در مشخصه مولد خورشیدی صدق می‌نمایند. درصد خیلی کمی از مقاله‌های مرجع مقدار اندازه‌گیری‌ها به صورت مختصر و نه مفصل انجام شده است اما در این مقاله به صورت کامل و مفصل مقادیر اندازه‌گیری ارائه شده است.

۳- با روش تلفیقی که از ابتکار و خلاقیت جدید و همچنین از خواص ماتریس‌ها در متلب استفاده شده است، راندمان به‌دست آمده ناشی از ردیابی نقطه حداکثر توان در این تحقیق حداکثر مقدار ممکن است، زیرا مقدار به‌دست آمده نقطه حداکثر توان تحت هر شرایط دما و تابش، اختلافش با مقدار واقعی بسیار کوچک و در حد صفر است. برای نمونه در بخش سوم این مقاله مقدار راندمان پنل خورشیدی به‌دست آمده با راندمان ارائه شده در سه مقاله مرجع مقایسه شده که راندمان به‌دست آمده در این تحقیق از راندمان ارائه شده در هر سه مقاله مرجع بیشتر است.

۴- در این تحقیق مقادیر کمیت‌ها و پارامترها به دو روش شبیه‌سازی و اندازه‌گیری عملی به‌دست آمده و مقادیر واقعی ارائه شده است.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}, \frac{\partial f_1}{\partial x_2}, \frac{\partial f_1}{\partial x_3}, \dots, \dots, \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}, \frac{\partial f_2}{\partial x_2}, \frac{\partial f_2}{\partial x_3}, \dots, \dots, \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1}, \frac{\partial f_3}{\partial x_2}, \frac{\partial f_3}{\partial x_3}, \dots, \dots, \frac{\partial f_3}{\partial x_n} \\ \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1}, \frac{\partial f_n}{\partial x_2}, \frac{\partial f_n}{\partial x_3}, \dots, \dots, \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

معادله‌های (۶ تا ۸) از حالت اتصال کوتاه و حالت مدار باز مشخصه سلول خورشیدی (PV) به دست آمده‌اند [۱۸].

$$I_{ph} = I_s \left( \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_T}\right) - 1 \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (6)$$

$$R_s = \frac{R_{sh}}{I_{sc}} \left[ I_{ph} - I_{sc} - I_s \left( \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{V_T}\right) - 1 \right) \right] \quad (7)$$

$$R_{sh} = V_{oc} \left[ I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_T}\right) - 1 \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

معادله (۹) محاسبه جریان اشباع معکوس دیودی و معادله (۱۰) محاسبه مقاومت سری مشخصه سلول خورشیدی را نشان می‌دهند [۲۱-۱۸].

$$I_s = I_{s,ref} \left(\frac{T_{ref}}{T}\right)^3 \exp\left(\frac{E_g q}{k n T}\right) \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right) \quad (9)$$

$$R_s = R_{s,ref} - \left[\left(\frac{V_T}{I_s}\right) \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_T}\right)\right] \quad (10)$$

معادله (۱۱) محاسبه راندمان مولد خورشیدی را نشان می‌دهد. راندمان با (EF) نمایش داده شده است [۱۸].

$$EF = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_m I_m}{P_{s,R}(w)} \quad (11)$$

معادله (۱۲) محاسبه ضریب ثابت نسبت نقطه حداکثر توان به حاصل ضرب ولتاژ مدار باز (Voc) در جریان اتصال کوتاه (Isc) مولد خورشیدی تحت هر شرایط دما و تابش را نشان می‌دهد. این ضریب نسبی با FF نمایش داده شده است [۱۸].

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (12)$$

معادله (۱۳) محاسبه ولتاژ حرارتی مشخصه سلول خورشیدی را ارائه می‌دهد. این کمیت تابعی از دما است [۱۵].

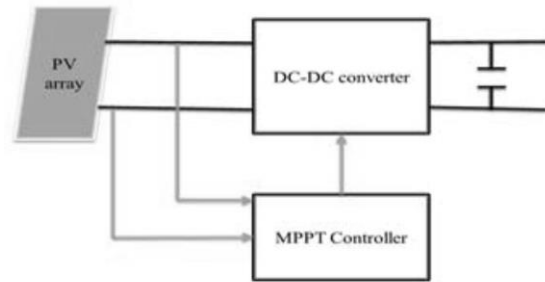
$$V_T = \frac{n k T}{q} \quad (13)$$

تابع کنترل مبدل جریان مستقیم در معادله (۱۴) ارائه شده است. این تابع از ترکیب مشخصه مولد خورشیدی در معادله (۱) با روابط (۱۵) به دست آمده است.

$$U = \frac{1}{I_0} \left[ \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)^{-1} \left( I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V_D + I_P R_s}{V_T}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V_D}{R_{sh}}\right) \right) \right] \quad (14)$$

معادلات ارائه شده در روابط (۱۵) ارتباط بین ورودی و خروجی مبدل جریان مستقیم را نشان می‌دهند [۵].

بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده تحت هر شرایط دما و تابش نقطه حداکثر توان ردیابی و (توسط فرمان مناسبی که به مبدل جریان مستقیم داده می‌شود) به بار خروجی انتقال می‌یابد [۱۷].



شکل ۲. بلوک دیاگرام سامانه مورد مطالعه

### ۳-۲. مدل سازی ریاضی سامانه مورد مطالعه

مشخصه یک سلول فتوولتائیک (PV) در رابطه (۱) نشان داده شده است [۱۸].

$$I_p = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V_p + I_p R_s}{V_T}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V_p + I_p R_s}{R_{sh}}\right) \quad (1)$$

رابطه (۲) الگوریتم معروف (نیوتن - رافسون) برای حل دستگاه معادلات غیر خطی را نشان می‌دهد.

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + [J^{(k)}]^{-1} \cdot [C - F^{(k)}] \quad (2)$$

روابط (۳) ماتریس‌های ستونی هستند. ماتریس (X) ماتریس مجهول‌های مطلوب است که در این الگوریتم به دست می‌آیند. ماتریس (C) ماتریس ستونی با درایه‌های مقدار ثابت است.

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

رابطه (۴) ماتریس (F) یک ماتریس مربعی است که توابع غیر خطی مورد استفاده در الگوریتم (نیوتن - رافسون) را نمایش می‌دهد. این توابع معادلات دستگاه غیر خطی را شکل می‌دهند و تعداد آن‌ها برابر تعداد مجهول‌های مطلوب است.

$$F = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ f_3(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

رابطه (۵) ماتریس مربعی (J) مشتقات جزئی توابع نسبت به متغیرهای مستقل را نمایش می‌دهد. متغیرها در ماتریس ستونی (X) مشخص شده‌اند.

پنل توسط آقای فیصل نایان و همکارانش و نیز از راندمان به دست آمده برای پنل توسط آقای ادواردو و همکارانش بیشتر است [۲۰-۱۸].

جدول ۲. مقادیر کمیت‌ها در شرایط مرجع برای پنل

Conditions	$T_r=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $G_r=1000\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$		
Panel Values	Simulated	Measured	Actual values
$I_{sc}\text{ (A)}$	8.8659400000	8.8666670	8.865940100
$V_{oc}\text{ (V)}$	37.200000000	37.100000	37.19975000
$I_m\text{ (A)}$	8.3529830000	8.3900000	8.352981000
$V_m\text{ (V)}$	31.514600000	31.600000	31.51469000
$P_m\text{ (W)}$	263.24091260	265.12400	263.2409000
FF	0.7981520969	-----	-----
$E_{max}\text{ (%)}$	0.0006720500	-----	-----
$P_{s,R}\text{ (W)}$	1528.0902000	-----	-----
EF(%)	17.226791490	-----	-----

بر اساس نتایج به دست آمده از این تحقیق درصد خطای نسبی ردیابی نقطه حداکثر توان برای پنل که از ۶۰ عدد سلول خورشیدی تشکیل شده برابر است با درصد خطای نسبی ردیابی نقطه حداکثر توان یک مولد خورشیدی که از ۱۰۸۰ سلول خورشیدی تشکیل شده است.

### ۳-۲. ارائه نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مقادیر کمیت‌های پنج شرایط دما و تابش مختلف مولد انرژی الکتریکی خورشیدی و انجام تحلیل

جدول‌های (۳) و (۴) مقادیر کمیت‌های مطلوب حاصل از نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری تحت پنج شرایط دما و تابش مختلف یک مولد خورشیدی کوچک را ارائه می‌دهند. در این جدول‌ها درصد خطای نسبی از مقایسه مقدار شبیه‌سازی با مقدار واقعی محاسبه می‌شود. بدیهی است که به دلیل خطای سامانه‌های اندازه‌گیری مقایسه مقدار اندازه‌گیری با مقدار واقعی درصد خطای بیشتری خواهد داشت. راندمان (EF) و ضریب نسبی (FF) مولد خورشیدی تحت پنج شرایط دما و تابش مختلف محاسبه شده‌اند. حداکثر توان در این مولد خورشیدی ۴۷۳۸/۳۶ وات و حداقل توان این مولد ۶۲۸/۳۲ وات است. هر دوی این مقادیر نقطه کار حداکثر توان مشخصه مولد خورشیدی تحت شرایط دما و تابش خورشید است که در جدول (۳) درج شده‌اند. خطای نسبی ردیابی نقطه حداکثر توان پنل تحت شرایط مرجع که در جدول (۲) نوشته شده با خطای نسبی ردیابی نقطه حداکثر توان مولد خورشیدی تحت شرایط مرجع که در جدول (۳) درج شده برابر است. برابری درصد خطای نسبی ردیابی نقطه حداکثر توان برای پنل و مولد خورشیدی اثبات می‌نماید که روش پیشنهادی مورد استفاده در این تحقیق مستقل از میزان توان مولد است. بنابراین روش پیشنهادی به کار رفته در این مقاله برای مولدهای خورشیدی توان

$$V_o = UV_p \quad , \quad I_p = UI_o \quad (15)$$

معادله (۱۶) جریان الکتریکی حالت اتصال کوتاه مشخصه سلول خورشیدی (PV) را ارائه می‌دهد.

$$I_{sc} = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{V_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}}\right) \quad (16)$$

معادله (۱۷) ولتاژ حالت مدار باز مشخصه سلول خورشیدی (PV) را نشان می‌دهد.

$$V_{oc} = \left[ I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_T}\right) - 1 \right) \right] R_{sh} \quad (17)$$

معادله (۱۸) محاسبه جریان اشباع معکوس با استفاده از حالت جریان اتصال کوتاه مشخصه سلول خورشیدی (PV) به دست آمده است.

$$I_s = \frac{I_{ph} - I_{sc}}{\exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{V_T}\right) - 1} - \left(\frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}}\right) \quad (18)$$

### ۳. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری این تحقیق همراه با انجام تحلیل و توضیح لازم

#### ۳-۱. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مقادیر پارامترها و کمیت‌ها تحت شرایط مرجع برای یک سلول و پنل خورشید

جدول (۱) مقادیر پارامترهای به دست آمده در شبیه‌سازی و اندازه‌گیری را ارائه می‌دهد. در این جدول درصد خطای نسبی از مقایسه مقدار شبیه‌سازی با مقدار واقعی<sup>۱</sup> برای سلول خورشیدی محاسبه شده است.

جدول ۱. مقادیر پارامترها در شرایط مرجع برای سلول

Conditions	$T_r=25\text{ }^\circ\text{C}$ , $G_r=1000\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$		
Parameters Cell Values	Simulated	Measured	Actual value
$R_s\text{ (}\Omega\text{)}$	0.0053499	0.005358800	0.00535000000
$R_{sh}\text{ (}\Omega\text{)}$	3.9567899	3.956850000	3.95680000000
$I_s\text{ (nA)}$	0.1214000	0.121327300	0.12139772982
$I_{ph}\text{ (A)}$	8.8700000	8.870762700	8.87005000000
$V_T\text{ (mV)}$	24.796096	24.796096000	24.7960960000
$E_{max}\text{ (%)}$	0.0018700000000		

جدول (۲) مقادیر کمیت‌های مطلوب به دست آمده از شبیه‌سازی و اندازه‌گیری تحت شرایط دما و تابش مرجع برای پنل خورشیدی را ارائه می‌دهد. در این جدول درصد خطای نسبی از مقایسه مقدار شبیه‌سازی با مقدار واقعی محاسبه شده است. بدیهی است که به دلیل خطای سامانه‌های اندازه‌گیری مقایسه مقدار اندازه‌گیری با مقدار واقعی درصد خطای بیشتری دارد. راندمان (EF) و ضریب نسبی (FF) پنل خورشیدی تحت شرایط دما و تابش مرجع نیز محاسبه شده است. راندمان به دست آمده در این تحقیق تحت شرایط دما و تابش مرجع برای پنل از راندمان به دست آمده برای

<sup>1</sup> Actual Value

جدول ۳. مقادیر کمیت‌های سه شرایط دمایی و تابشی مولد

Conditions			
$T_r=25\text{ C}^\circ, G_r=1000\frac{w}{m^2}$			
Quantity	Simulated	Measured	Actual value
$I_{sc}(A)$	26.597820000	26.600000	26.59782100
$V_{oc}(v)$	223.20000000	222.59880	223.1649000
$I_m(A)$	25.059000000	24.991858	25.05899700
$V_m(v)$	189.08800000	189.60001	189.0881300
$p_m(w)$	4738.3600000	4738.4566	4738.358800
FF	0.7981560695	-----	-----
$E_{max}(\%)$	0.0006720500	-----	-----
$p_{S,R}(w)$	27505.623600	-----	-----
EF(%)	17.226714900	-----	-----
U(MPPT)	1.1634794400	-----	-----
$I_0(MPPT)$	21.538000000	-----	-----
$V_0(MPPT)$	220.00000000	-----	-----
$p_0(MPPT)$	4738.3600000	-----	-----
Conditions			
$T=30\text{ C}^\circ, G=200\frac{w}{m^2}$			
Quantity	Simulated	Measured	Actual value
$I_{sc}(A)$	5.3715000000	5.38500000	5.371524000
$V_{oc}(v)$	205.23301000	205.800100	205.2338900
$I_m(A)$	3.6380000000	3.66000000	3.638000000
$V_m(v)$	172.70962000	172.800000	172.7096150
$p_m(w)$	628.32000000	628.570000	628.3175794
FF	0.5699517470	-----	-----
$E_{max}(\%)$	0.0003500000	-----	-----
$p_{S,R}(w)$	5501.1247200	-----	-----
EF(%)	11.421664330	-----	-----
U(MPPT)	1.2738144000	-----	-----
$I_0(MPPT)$	2.8570000000	-----	-----
$V_0(MPPT)$	220.00000000	-----	-----
$p_0(MPPT)$	628.32000000	-----	-----
Conditions			
$T=35\text{ C}^\circ, G=400\frac{w}{m^2}$			
Quantity	Simulated	Measured	Actual value
$I_{sc}(A)$	10.743000000	10.7400000	10.74300100
$V_{oc}(v)$	208.02841000	208.800000	208.0284400
$I_m(A)$	9.4554021000	9.44000000	9.455402109
$V_m(v)$	178.66947600	178.766000	178.6694769
$p_m(w)$	1689.3197000	1687.55104	1689.318700
FF	0.7558987396	-----	-----
$E_{max}(\%)$	0.0005600000	-----	-----
$p_{S,R}(w)$	11002.249440	-----	-----
EF(%)	15.354311950	-----	-----
U(MPPT)	1.2313241000	-----	-----
$I_0(MPPT)$	7.6787259000	-----	-----
$V_0(MPPT)$	220.00000000	-----	-----
$p_0(MPPT)$	1689.3197000	-----	-----

متوسط و بزرگ هم قابل استفاده خواهد بود. بر اساس نتایج به‌دست آمده در جدول‌های (۳) و (۴)، درصد خطای نسبی ردیابی نقطه حداکثر توان برای پنج شرایط دما و تابش مختلف در حد صفر است و یک اختلاف بسیار کوچک با هم دارند. این نتیجه مهم نیز نشان می‌دهد که روش مورد استفاده در این مقاله مستقل از شرایط جغرافیایی محیط (شرایط دما و تابش) است. به بیان دیگر، اصول و اساس روش پیشنهادی مورد استفاده در این مقاله برای تمام شرایط دما و تابش و برای تمام شرایط جغرافیایی سطح زمین قابل استفاده خواهد بود. این نتایج مهم به دلیل روش تلفیقی مورد استفاده در این تحقیق است. بدیهی است که انتخاب بخش تجهیزات و ادوات قدرت به میزان حداقل و حداکثر توان مولد خورشیدی بستگی دارد. به‌صورت خلاصه اصول اساسی روش پیشنهادی مورد استفاده در این تحقیق مستقل از شرایط دما و تابش خورشید در سطح زمین و مستقل از میزان توان تولیدی مولد خورشیدی است.

۳-۳. شکل موج‌های حاصل از نتایج شبیه‌سازی برای پنج شرایط دما و تابش مختلف پنل و مولد خورشیدی همراه با تحلیل و توضیح لازم

۳-۳-۱. شکل موج‌های حاصل از نتایج شبیه‌سازی جریان الکتریکی بر حسب ولتاژ برای پنج شرایط دما و تابش مختلف یک پنل خورشیدی همراه با تحلیل و توضیح لازم

شکل (۳)، پنج شکل موج جریان بر حسب ولتاژ الکتریکی برای پنج شرایط دما و تابش مختلف را نمایش می‌دهد. اطلاعات کامل هر شکل موج ذیل آن نوشته شده است. تمامی مقادیر نوشته شده در این شکل نقطه کار حداکثر توان یک پنل خورشیدی برای پنج شرایط دما و تابش مختلف را مشخص می‌نمایند. این مقادیر با مقادیر عددی به‌دست آمده در جدول (۲) برابر هستند. شرایط دما و تابش مربوط به توان حداکثر و توان حداقل درون شکل (۳) نوشته شده است. با توجه به شکل موج‌ها برای پنج شرایط دما و تابش اختلاف ولتاژها خیلی کمتر از اختلاف جریان‌های الکتریکی است.

۳-۳-۲. شکل موج‌های حاصل از نتایج شبیه‌سازی جریان، ولتاژ و توان بر حسب زمان برای مولد خورشیدی همراه با تحلیل و توضیح لازم

شکل (۴) نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان الکتریکی خروجی مولد خورشیدی و قبل از مبدل جریان مستقیم برای پنج شرایط دما و تابش مختلف را نمایش می‌دهد. ذیل هر شکل موج اطلاعات کامل مربوط به آن شکل موج نوشته شده است. مقادیر جریان الکتریکی نوشته شده در این شکل مربوط به حالت پایدار و برابر مقادیر درج شده در جدول‌های (۳) و (۴) است.

## جدول ۴. مقادیر کمیت‌های دو شرایط دمایی و تابشی مولد

Conditions	T=40 C°, G=600 $\frac{W}{m^2}$		
	Simulated	Measured	Actual value
I <sub>sc</sub> (A)	16.11420000	16.1100000	16.41141970
V <sub>oc</sub> (v)	208.6333200	208.750000	208.6332984
I <sub>m</sub> (A)	14.79630530	14.8000000	14.79630582
V <sub>m</sub> (v)	177.8890032	177.898000	177.8890085
p <sub>m</sub> (w)	2632.100000	2632.89040	2632.153720
FF	0.782906622	-----	-----
E <sub>max</sub> (%)	0.000385000	-----	-----
p <sub>S,R</sub> (w)	16503.37416	-----	-----
EF(%)	15.94885976	-----	-----
U(MPPT)	1.236726276	-----	-----
I <sub>O</sub> (MPPT)	11.96388388	-----	-----
V <sub>O</sub> (MPPT)	220.0000000	-----	-----
p <sub>O</sub> (MPPT)	2632.100000	-----	-----
Conditions	T=45 C°, G=800 $\frac{W}{m^2}$		
Quantity	Simulated	Measured	Actual value
I <sub>sc</sub> (A)	21.48570000	21.4800000	21.48570270
V <sub>oc</sub> (v)	207.6378001	207.638800	207.6378050
I <sub>m</sub> (A)	19.98667800	20.0030000	19.98667802
V <sub>m</sub> (v)	175.5148273	175.491440	175.5148279
p <sub>m</sub> (w)	3507.958344	3510.35527	3507.958353
FF	0.786318514	-----	-----
E <sub>max</sub> (%)	0.000290000	-----	-----
p <sub>S,R</sub> (w)	22004.49888	-----	-----
EF(%)	15.94200515	-----	-----
U(MPPT)	1.253475546	-----	-----
I <sub>O</sub> (MPPT)	15.94526520	-----	-----
V <sub>O</sub> (MPPT)	220.0000000	-----	-----
p <sub>O</sub> (MPPT)	3507.958344	-----	-----

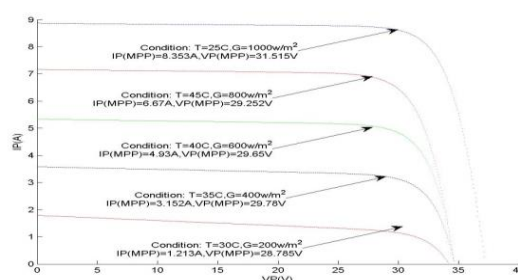
شکل (۵)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی را به‌صورت شکل موج ولتاژ الکتریکی خروجی مولد خورشیدی و قبل از مبدل جریان مستقیم برای پنج شرایط دما و تابش مختلف را نمایش می‌دهد. درون شکل اطلاعات کامل مربوط پنج شرایط دما و تابش درج شده است. مقادیر ولتاژ نوشته شده در این شکل مربوط به حالت پایدار و برابر مقادیر درج شده درون جدول‌های (۳) و (۴) است. با توجه به شکل موج‌ها مشاهده می‌شود که اختلاف بین مقادیر ولتاژها برای شرایط دما و تابش مختلف کم است.

شکل (۶)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌صورت شکل موج توان الکتریکی خروجی مولد خورشیدی بر حسب زمان و قبل از مبدل جریان مستقیم برای پنج شرایط دما و تابش مختلف را نمایش می‌دهد. مقادیر توان الکتریکی نوشته شده در این شکل مربوط به حالت پایدار و برابر مقادیر درج شده در جدول‌های (۳) و (۴) است. شرایط دما، شرایط تابش، توان حداقل و توان حداکثر درون شکل (۶) نوشته شده است. قابل توجه است تمام مقادیر توان‌ها برای شرایط دما و تابش مختلف مربوط به نقطه کار حداکثر توان مشخصه مولد خورشیدی است. در این تحقیق ادوات بدون تلفات توان الکتریکی فرض شده است. به بیان دیگر، مصرف توان داخلی قطعات صفر فرض شده است و به همین دلیل است که توان الکتریکی برای تمام شرایط دما و تابش قبل و بعد از مبدل جریان مستقیم با هم برابر هستند. البته بدیهی است در عمل قطعات و ادوات الکتریکی و الکترونیکی مقداری تلفات دارند.

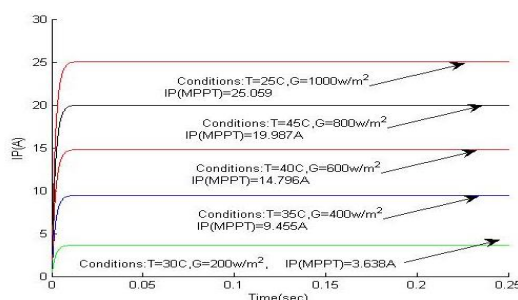
شکل موج‌های حاصل از شبیه‌سازی جریان، ولتاژ و توان خروجی بعد از مبدل جریان مستقیم و متصل به بار الکتریکی و همچنین شکل موج تابع کنترل بر حسب زمان همراه با تحلیل و توضیح لازم

شکل (۷)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی را به‌صورت شکل موج جریان الکتریکی مولد خورشیدی متصل به بار خروجی مبدل برای پنج شرایط دما و تابش مختلف را نمایش می‌دهد. در زیر هر شکل موج اطلاعات کامل مربوط به آن شکل موج نوشته شده است. مقادیر جریان الکتریکی نوشته شده در این شکل مربوط به حالت پایدار و برابر مقادیر درج شده در جدول‌های (۳) و (۴) این است. شکل (۸) نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌صورت شکل موج ولتاژ الکتریکی مولد خورشیدی متصل به بار خروجی و بعد از مبدل جریان مستقیم برای پنج شرایط دما و تابش مختلف را نمایش می‌دهد. مقادیر ولتاژ الکتریکی نوشته شده در این شکل مربوط به حالت پایدار و برابر مقادیر درج شده در جدول‌های (۳) و (۴) این است. درون شکل اطلاعات کامل برای پنج شرایط دما و تابش نوشته شده است.

شکل (۹)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌صورت شکل موج توان الکتریکی مولد خورشیدی متصل به بار خروجی مبدل جریان مستقیم و برای پنج شرایط دما و تابش مختلف را نمایش می‌دهد.

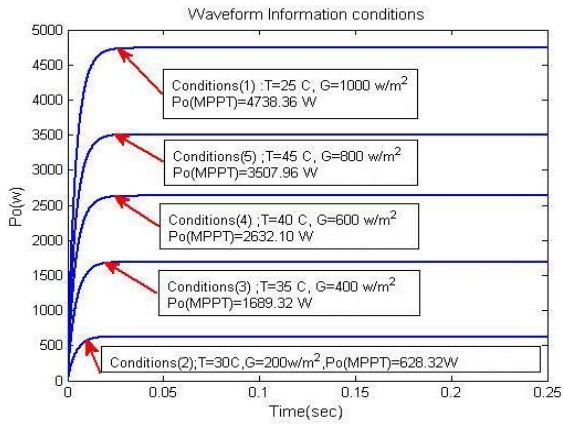


شکل ۳. شکل موج‌های جریان بر حسب ولتاژ پیل



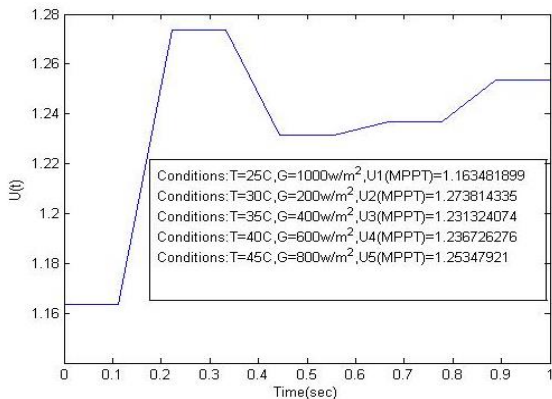
شکل ۴. شکل موج جریان بر حسب زمان





شکل ۹. شکل موج توان خروجی بر حسب زمان

مدت زمان شبیه‌سازی برای هر یک از شکل موج‌های (۴ تا ۹) ۲۵۰ میلی ثانیه است. با توجه به شکل موج‌های (۴ تا ۹) مشاهده می‌شود که زمان رسیدن دامنه موج به مقدار نهایی زمان بسیار کوچکی است. بنابراین برای پنج شرایط دما و تابش مختلف کنترل پایداری سامانه به شکل بسیار مناسبی انجام شده است. بر اساس نتایج شکل موج ولتاژهای خروجی مبدل در شکل (۸)، ولتاژهای خروجی برای پنج شرایط دما و تابش مختلف در زمانی بسیار کوچک به مقدار نهایی ثابت و مساوی می‌رسند. بنابراین کنترل مبدل ولتاژ با هدف تثبیت ولتاژ خروجی بر روی یک مقدار ثابت انجام شده است. شکل (۱۰)، نتایج حاصل از شبیه‌سازی به صورت شکل موج تابع کنترل مبدل خروجی مولد خورشیدی بر حسب زمان برای پنج شرایط دما و تابش مختلف را نمایش می‌دهد. درون شکل، اطلاعات کامل مربوط به هر شرایط دما و تابش خورشیدی درج شده است. اطلاعات نوشته شده در این شکل برابر مقادیر درج شده در جدول‌های (۳) و (۴) است.

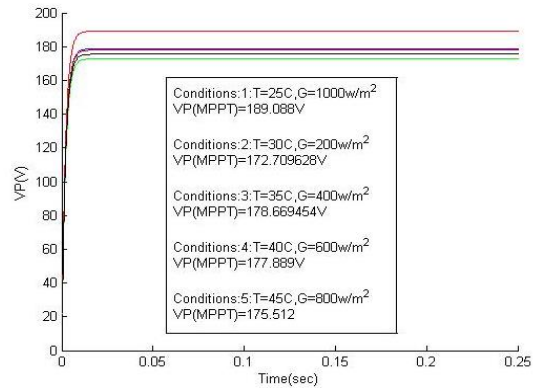


شکل ۱۰. شکل موج تابع کنترل بر حسب زمان

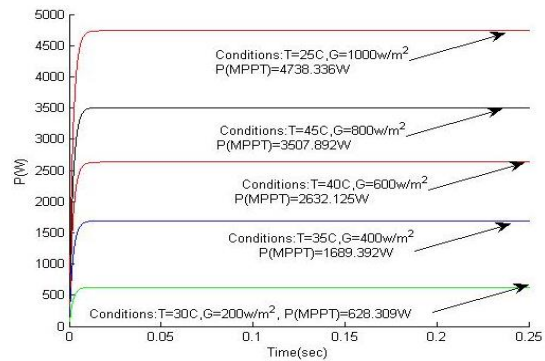
۳-۴. الگوریتم و فلوجارت برنامه رایانه‌ای نوشته شده در این مقاله

شکل (۱۱) الگوریتم برنامه نوشته شده در این مقاله را نمایش می‌دهد. الگوریتم با کلمه شروع (Start) آغاز می‌شود و با کلمه تکرار (Return) به پایان می‌رسد.

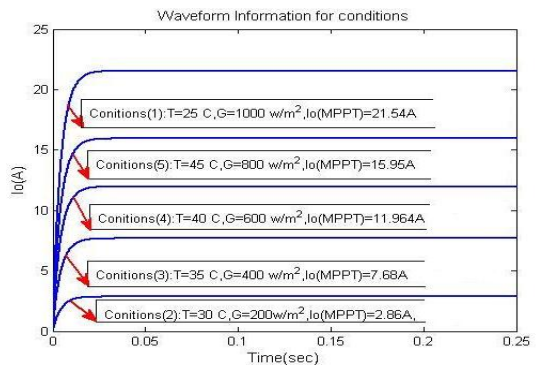
در زیر هر شکل موج اطلاعات کامل مربوط به آن شکل موج درج شده است. اطلاعات نوشته شده در این شکل مربوط به مقادیر حالت پایدار و برابر مقادیر درج شده در جدول‌های (۳) و (۴) است.



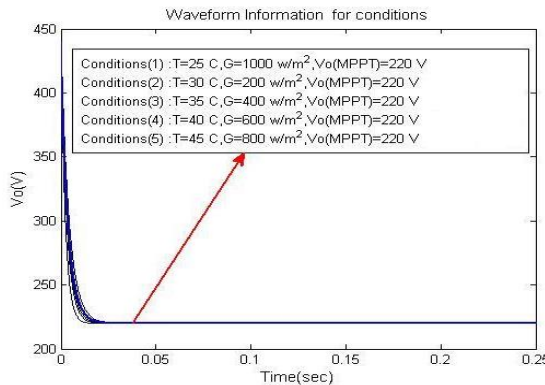
شکل ۵. شکل موج ولتاژ بر حسب زمان



شکل ۶. شکل موج توان بر حسب زمان



شکل ۷. شکل موج جریان خروجی بر حسب زمان



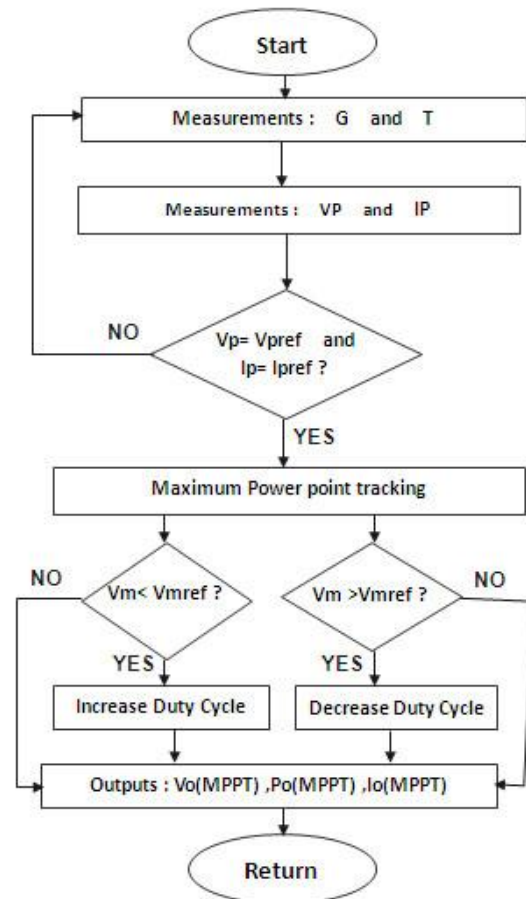
شکل ۸. شکل موج ولتاژ خروجی بر حسب زمان

### ۵. فهرست علائم و اختصارات

توضیح	اختصار
ولتاژ خروجی سلول PV	$V_p$
جریان خروجی سلول PV	$I_p$
شدت تابش خورشید بر مولد خورشیدی	G
دمای سلول بر حسب درجه کلونین	T
دمای مرجع بر حسب درجه کلونین	$T_{ref}$
جریان تابشی تولید شده در سلول PV	$I_{ph}$
جریان اشباع معکوس سلول PV	$I_s$
ولتاژ حرارتی مشخصه سلول PV	$V_T$
ثابت بولتزمن با مقداری ثابت بر حسب ژول بر درجه کلونین $K = 1.3806503 \times 10^{-23} \frac{1}{K}$	K
بار الکتریکی یک الکترون با مقداری ثابت بر حسب کلن $q = 1.602 \times 10^{-19} C$	q
مقاومت سری سلول PV	$R_s$
جریان اتصال کوتاه سلول PV	$I_{sc}$
مقاومت موازی مشخصه سلول PV	$R_{sh}$
انرژی باند توقف سیلیکون با مقداری ثابت بر حسب الکترون-ولت $E_g = 1.12 eV$	$E_g$
ولتاژ مدار باز سلول PV	$V_{oc}$
ولتاژ نقطه حداکثر توان مولد PV	$V_m$
جریان نقطه حداکثر توان مولد PV	$I_m$
توان حداکثر مولد PV بر حسب وات	$P_m$
توان ورودی مولد (PV) یا همان توان تابشی $p_{s,R}(w)$ بر حسب وات	$P_{in}$
ثابت دیود و مقداری ثابت	n
تابع کنترل مبدل (DC-DC) فاقد واحد	U
ولتاژ خروجی مبدل (DC-DC)	$V_o$
جریان خروجی مبدل (DC-DC)	$I_o$
خطای نسبی حداکثر	$E_{max}$
ردیابی نقطه حداکثر توان	MPPT
نقطه حداکثر توان	MPP
نانو آمپر	nA
میلی ولت	mV

### ۶. مراجع

- [1] Gaga, A.; Errahimi, F.; Es-Sbai, N. "Design and Implementation of MPPT Solar System Based on the Enhanced P&O Algorithm Using Labview"; Int. Renewable and Sustainable Energy Conf., 2014, 203-208.
- [2] Al-Barazanchi, S. A. M.; Vural, A. M. "Modeling and Intelligent Control of a Stand-Alone PV-Wind-Diesel-Battery hybrid system"; Int. Conf. Control, Instrumentation, Communication and Computational Technol., 2015, 423-430.
- [3] Sheng, S.; Li, P.; Tsu, C. T.; Lehman, B. "Optimal Power Flow Management in a Photovoltaic Nanogrid with Batteries"; IEEE Energy Conversion Congress and Exposition 2015, 4222-4228.
- [4] Chetanakumar Hadimani, S.; Raju, A. B.; Radha, R.; Jyoti, R. "Photovoltaic Based PMDC Motor Drive System Using MPPT"; Second Int. Conf. Cognitive Computing and Information Proc., 2016, 1-6.



شکل ۱۱. الگوریتم برنامه رایانه‌ای

### ۴. نتیجه‌گیری

با استناد به تحلیل نتایج عملی و شبیه‌سازی به‌دست آمده، روش پیشنهادی در این مقاله با هدف تأمین انرژی پایدار و افزایش تاب آوری سایت‌های مخابراتی سیار و مستقر در مناطق جغرافیایی مختلف کشور قابل استفاده است. تأمین انرژی پایدار برای ماهواره‌های مخابراتی با استفاده از مولد خورشیدی و به روش پیشنهادی در این مقاله قابل تحقیق و بررسی است. اصول و اساس روش پیشنهادی در این مقاله برای هر پنل خورشیدی و با هر نوع فناوری ساخت قابل استفاده است. افزایش راندمان مولد خورشیدی مربوط به فناوری طراحی و ساخت سلول‌های خورشیدی خارج از موضوع این تحقیق است و یک مطلب تحقیقی دیگر است. استفاده از روش پیشنهادی در این تحقیق در راستای کنترل و بهینه‌سازی سامانه‌های غیر خطی با مشخصه متغیر، مشابه و مرتبط با حوزه پدافند نوین قابل تحقیق و بررسی است. با استناد به نتایج عملی و شبیه‌سازی به‌دست آمده از این تحقیق روش پیشنهادی در این مقاله قابل اجرایی شدن است. در این مقاله برای پنج شرایط دما و تابش کنترل و بهینه‌سازی مولد خورشیدی انجام شده است، اما در عمل اصول و اساس این روش پیشنهادی برای هر شرایط دما و تابش احتمالی و با هر مقداری قابل اجرایی شدن است.

- [14] Li, L.; Xiong, G.; Yuan, X.; Zhang, J.; Chen, J. "Parameter Extraction of Photovoltaic Models Using a Dynamic Self-Adaptive and Mutual- Comparison Teaching-Learning-Based Optimization"; *IEEE Access*, 2021, 9, 52425-52441.
- [15] Perez, F.; Iovine, A.; Damm, G.; Galai-Dol, L.; Ribeiro, P. F. "Stability Analysis of a DC MicroGrid for a Smart Railway Station Integrating Renewable Sources"; *IEEE Trans. Control Syst. Tech.* 2020, 28, 1802-1816.
- [16] Belkassmi, Y.; Rafiki, A.; Gueraoui, K.; Elmaimouni, L.; Tata, O.; Hassanain, N. "Modeling and Simulation of Photovoltaic Module Based on one Diode Model Using Matlab/Simulink"; *Int. Conf. Eng. & MIS*, 2017, 1-6.
- [17] Faber, J.; Raath, J.; Vermaak, H. "MPPT Photovoltaic Test Instrument with Data Logging Capabilities"; *Pattern Recognition Association of South Africa and Robotics and Mechatronics 2017*, 193-196.
- [18] Nayan, M. F.; Ullah, S. M. S.; Saif, S. N. "Comparative Analysis of PV Module Efficiency for Different Types of Silicon Materials Considering the Effects of Environmental Parameters"; *Int. Conf. Electrical Eng. Inform. Commun. Technol.*, 2016, 1-6.
- [19] Sarquis Filho, E. A.; Costa, F. F.; Tahim, A. P. N.; Lima, A. C. D. C. "Photovoltaic Panel Simulation Based on Individual Cell Condition"; *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2016, 1-7.
- [20] Nayan, M. F.; Ullah, S. M. S. "Modelling of Solar Cell Characteristics Considering the Effect of Electrical and Environmental Parameters"; *Int. Conf. Green Energy Technol.*, 2015, 1-6.
- [21] Abbassi, A.; Dami, M. A.; Jemli, M. "Parameters Identification of Photovoltaic Modules Based on Numerical Approach for the Single-Diode Model"; *Int. Conf. Green Energy Conversion Syst.*, 2017, 1-7.
- [5] Anddoulssi, R.; Draou, A.; Jerbl, H.; Alghonamy, A.; Khlal, B. "Non Linear Control of a Photovoltaic Water Pumping System"; *Energy Renewabe Procedia*. 2013, 42, 328-336.
- [6] Choudhary, P.; Mahendra, S. N. "Feedback Control and Simulation of DC-DC Buck Converter for Solar Photovoltaic Array"; *IEEE Uttar Pradesh Section Int. Conf. Electrical, Computer and Electronics Eng. (UPCON)*, 2016, 591-596.
- [7] Bálský, M.; Bayer, R. "Electrical and Heat Performance of Solar Concentrator with Tracking System"; *Int. Scientific Conf. Electric Power Eng.*, 2016, 1-6.
- [8] Magee, C. L.; Benson, C. L. "On Improvement Rates for Renewable Energy Technologies: Solar PV, Wind Turbines, Capacitors, and Batteries"; *Renwable Energy* 2014, 68, 745-751.
- [9] Alegria, E.; Brown, T.; Minear, E.; Lasseter, R. "CERTS Microgrid Demonstration with Large-Scale Energy Storage and Renewable Generation"; *IEEE Tans. Smart Grid* 2013, 5, 937-943.
- [10] Wandhare, R. G.; Agarwal, V. "Novel Stability Enhancing Control Strategy for Centralized PV-Grid Systems for Smart Grid Applications"; *IEEE Trans. Smart Grid* 2014, 5, 1389-1396.
- [11] Iovine, A.; Siad, S. B.; Damm, G.; De Santis, E.; Di Benedetto, M. D. "Nonlinear Control of a DC MicroGrid for the Integration of Photovoltaic Panels"; *IEEE Trans. Automation Sci. Eng.* 2017, 14, 524-535.
- [12] Banaei, M. R.; Alizadeh, R. "Simulation-Based Modeling and Power Management of All-Electric Ships Based on Renewable Energy Generation Using Model Predictive Control Strategy"; *IEEE Intell. Transport. Syst. Mag.* 2016, 8, 90-103.
- [13] Piazza, M. C. Di; Luna, M.; Tona, G. L.; Piazza, A. D. "Improving Grid Integration of Hybrid PV-Storage Systems Through a Suitable Energy Management Strategy"; *IEEE Trans. Industry App.* 2019, 55, 60-68.