

تاریخ دریافت: ۱۶ اردیبهشت ۱۴۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۸ بهمن ۱۴۰۱ صفحات ۵۵ الی ۷۵

## بررسی عوامل موثر در شبیه‌سازی و استقرار بهینه تولید برق فتوولتائیک

رضا سعدی

کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

reza.saadi@email.kntu.ac.ir

حسین محسنی

استادیار، گروه مهندسی مالی، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران،

ایران، mohseni@kntu.ac.ir

**چکیده:** فناوری فتوولتائیک توانایی تامین برق مصارف مختلف از منبع تجدیدپذیر خورشید را دارا است. استقرار و نصب تجهیزات فتوولتائیک در مناطق مختلف، تابع نوع آب و هوا و شرایط اقلیمی است. مسئله اصلی در توسعه این سیستم‌ها، افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های تولید برق است. برای دستیابی به این هدف، بهینه‌سازی در چند حیطه و به صورت بین‌رشته‌ای مورد نیاز است. نظر به گستره مناطق مستعد این حوزه انرژی در کشور، استقرار مناسب صفحات خورشیدی فتوولتائیک موجب تامین برق صنایع و جهش تولید در مناطق مختلف است. در این تحقیق استان کرمانشاه به عنوان یک منطقه سرد و خشک کوهستانی در دامنه زاگرس مورد مطالعه قرار گرفته است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری انرژی با در نظر گرفتن میزان تابش، بکمک یک کنترل‌کننده بهینه امکان‌پذیر است. کنترل‌کننده می‌تواند از یادگیری عمیق استفاده کند. مهمترین عامل در استقرار تجدیدپذیرها، هزینه سوخت‌های فسیلی است. در ادامه عوامل دیگری هم چون انتشار گاز کربن دی‌اکسید، صادرات فناوری بالا، معیارهای نظارتی و نهادها و معیارهای اجتماعی نیز از معناداری مناسب برخوردارند.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی خورشیدی فتوولتائیک، شبیه‌سازی، یادگیری عمیق، بهره‌وری انرژی

## ۱- مقدمه

به پدیده ای که در اثر تابش نور بدون استفاده از مکانیزم های متحرک، برق تولید می کند، پدیده فتوولتائیک و به هر سیستمی که از این پدیده ها استفاده کند، سیستم فتوولتائیک گفته می شود. هر چند هزینه استفاده از انرژی خورشیدی بالا به نظر می رسد، اما در سیاست گذاری انرژی، فقط هزینه در نظر گرفته نمی شود، بلکه فواید حاصل از به کارگیری آنها، مانند کاهش آلودگی، پایداری و... نیز مدنظر است (جیا<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). از مصارف و کاربردهای فتوولتائیک می توان از جمله به روشنایی خورشیدی، نیروگاه های فتوولتائیک، مصارف فضانوردی، سیستم تغذیه کننده یک واحد مسکونی، ماشین حساب، ساعت و غیره اشاره کرد (سمپایو<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۸).

انرژی فتوولتائیک یک منبع انرژی پاک و سبز است و یک روش عالی برای کاهش اثر کربن است. این انرژی مانع تولید گاز گلخانه ای است و به جز نیاز به منبع آب تمیز از هیچ منبع دیگری استفاده نمی کند (غلامی و همکاران، ۲۰۲۰). از این رو، ایمن و سازگار با محیط زیست است. همچنین هزینه تولید برق پس از تامین پانل های فتوولتائیک فاقد نوسان اقتصادی است. برق سنتی به شدت به سوخت- های فسیلی مانند زغال سنگ و گاز طبیعی متکی است که در آن قیمت انرژی در طول روز تغییر می کند. برق فتوولتائیک استقلال برق از بخش سوخت را افزایش می دهد (لیان<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). انرژی فتوولتائیک فاقد محدودیت سرزمینی بوده و به راحتی قابل دسترسی است. مزارع فتوولتائیک نشان می دهند که چگونه انرژی خورشیدی را می توان در زمین های خشک و بدون استفاده ایجاد کرد. برق باید از طریق شبکه های گسترده از نیروگاه های بزرگ به مصرف کنندگان نهایی منتقل شود. انتقال از راه دور به معنی تلفات بخشی از انرژی است. با توجه به مسافت کم، تولید انرژی فتوولتائیک در پشت بام ها موجب افزایش بهره وری برق است، بنابراین احتمال قطع خدمات کاهش می یابد که این به نوبه خود، امنیت شبکه بیشتری را فراهم می کند (دباستانی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۰).

اگرچه رشد انرژی های تجدیدپذیری مانند فتوولتائیک، امکان ترکیبی بودن را دارا است اما بهینه سازی در استقرار آنها نظیر مواردی چون طول عمر پایین باتری ها برای تامین مصارف بالا و میزان ذخیره سازی

<sup>۱</sup> Jia

<sup>۲</sup> Sampaio

<sup>۳</sup> Lian

<sup>۴</sup> Debastiani

در طول روز براساس تابعی از تابش ضروری است. همچنین بررسی کمیت و کیفیت تابش در ساعات شبانه روز مورد نیاز است تا بتوان توجیه پذیری سیستم را از حیث مقرون به صرفه بودن ارزیابی کرد. براین اساس رویکردی که این تحقیق ارائه می‌دهد، به کارگیری یک ساختار هوشمند به کمک روش‌های یادگیری عمیق است. موضوع اصلی این تحقیق، ارائه یک سیستم هوشمند فتوولتاییک در یکی از شهرهای استان کرمانشاه به عنوان مطالعه موردی است.

بسته به هدف بهینه‌سازی عوامل، ورودی مدل، ترکیب مشخصی از متغیرهای زمان بندی، متغیرهای آب و هوایی و متغیر مقیاس زمانی می‌باشد. متغیرهای زمان بندی مدنظر در مدل یادگیری عمیق عبارتند از ساعات روز (۰-۲۴)، روزهای هفته (۱-۷)، روزهای ماه (۱-۳۰) و شماره ماه (۱-۱۲). مشخص است که بار مصرفی در منطقه ای کوهستانی و بالاتر از ارتفاع دریا دارای همبستگی بالایی با متغیرهای زمان بندی می‌باشد. خروجی توان فتوولتاییک تابعی از متغیرهای زمان و متغیرهای مرتبط با آب و هوا هستند. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که شرایط آب و هوایی به ویژه دما، بر روی بار تاثیر دارد. در این مطالعه، متغیرهای آب و هوایی برای پیش بینی بار شامل دما، رطوبت و سرعت باد است. به غیر از این متغیرهای آب و هوایی، تابش افقی کل و تابش افقی پراکنده در پیش‌بینی خروجی توان فتوولتاییک نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ادامه پس از مروری بر پیشینه تحقیق، الگوی تحقیق، مدل شبیه‌سازی و درنهایت خروجی‌ها ارائه خواهند شد.

## ۲- مروری بر پیشینه تحقیق

تیتری<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، یک کنترل کننده MPPT<sup>۲</sup> جدید براساس الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان برای سیستم‌های فتوولتاییک تحت شرایط جزئی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق استفاده از روش جدید به روزرسانی فرومون در الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچگان جهت کنترل MPPT در سیستم فتوولتاییک به عنوان نوآوری ارائه شد. صرفه جویی در زمان محاسبه، قابلیت ردیابی با دقت بالا، نوسان صفر، همگرایی سریع و قدرت بسیار بالا به عنوان نتایج تحقیق به شمار می‌روند.

<sup>۱</sup> Titri

<sup>۲</sup> Maximum power point tracking

الدایر<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۸)، استفاده از ساختار ترکیب شبکه عصبی و منطق فازی نیز در زمینه کنترل MPPT در سیستم‌های فتوولتائیک را مورد بررسی قرار دادند. طراحی و اجرای مدل MPPT مبتنی بر مدل مرجع شبکه-عصبی فازی تحت عنوان ANFIS<sup>۲</sup> با استفاده از FPGA<sup>۳</sup> برای سیستم فتوولتائیک ارائه شد. نتایج آنها نشان داد که کنترل کننده مدل ANFIS دارای پاسخ دینامیکی کارآمدتر و بهتر نسبت به روش هدایت افزایشی و روش ولتاژ ثابت است.

کیهال<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۹)، یک طرح MPPT بهبود یافته با استفاده از کنترل حالت آبخاری مشتق شده یکپارچه برای سیستم‌های فتوولتائیک تحت تغییرات سریع تابش را ارائه دادند. MPPT پیشنهاد شده به منظور افزایش ردیابی MPP<sup>۵</sup> در تغییر تغییرات ناگهانی تابش طراحی شده است. نتایج حاصل از MPPT پیشنهاد شده نشان دهنده عملکرد پویایی عالی در تغییرات سریع تابش برای حل مشکل نقطه داغ است.

گلرودباری و ون سارک<sup>۶</sup> (۲۰۲۰)، شبیه‌سازی تفاوت عملکرد بین سیستم‌های فتوولتائیک دریایی و زمینی ارائه دادند. داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده آب و هوا از دو مکان مختلف، یکی در محوطه دانشگاه اوترخت<sup>۷</sup> و دیگری در دریای شمال، برای شبیه‌سازی سیستم‌ها استفاده شد. نتایج آنها نشان داد که متوسط انرژی سالانه خروجی در مقایسه با خشکی در دریا ۱۲.۹۶٪ بیشتر است. با این حال، در بعضی از ماه‌ها، این انرژی خروجی نسبی تا ۱۸٪ عملکرد بیشتر در دریا افزایش می‌یابد.

نبی<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی مشکلات مردم روستایی اتیوپی در ذخیره‌سازی انرژی به کمک سیستم فتوولتائیک محرک در دریا بوسیله شناسایی و با استفاده از فرآیندهای سلسله‌مراتبی تحلیلی وزن دهی پرداختند. آنها با هدف شناسایی بیشترین سطح قابل استفاده برای استفاده از سطح آب در سدهای آبیاری منطقه ای آمهارا<sup>۹</sup> برای تولید انرژی الکتریکی بود. قابلیت استفاده از سطح آب برای

<sup>۱</sup> Aldair

<sup>۲</sup> Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems

<sup>۳</sup> Field programmable gate array

<sup>۴</sup> Kihal

<sup>۵</sup> Maximum power point

<sup>۶</sup> Golroodbari, S. Z., & van Sark

<sup>۷</sup> Utrecht University campus

<sup>۸</sup> Nebey

<sup>۹</sup> Amhara

نیروگاه فتوولتائیک خورشیدی شناور به ترتیب ۶۳.۸۳٪، ۶۱.۰۹٪، و ۵۷.۲۰٪ در سدهای آبیاری آنجرب<sup>۱</sup>، ریب<sup>۲</sup> و کوگا<sup>۳</sup> تعیین کردند.

بنتویا و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۲۱) به بررسی عملکرد و شبیه‌سازی نیروگاه‌های فتوولتائیک بیست مگاواتی طی دوره زمانی ۲۶ ماهه در منطقه گرمسیر جنوب الجزایر با استفاده از نسبت‌های کارایی پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که عملکرد نیروگاه به فناوری سلول، تابش و شرایط محیطی بویژه دما رابطه دارد. همچنین انحرافات بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های پایش واقعی در مورد نرم افزار شبیه‌سازی HOMER Pro کمتر بود.

وانگ و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۲۲) به بررسی تعیین مناطق مناسب برای نصب نیروگاه خورشیدی در ویتنام با استفاده از روش تحلیل پوششی داده‌ها<sup>۶</sup> (DEA) و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره خاکستری<sup>۷</sup> (G-MCDM) پرداختند. در مرحله اول برای انتخاب مکان‌های با کارایی بالاتر از تحلیل پوششی داده‌ها استفاده شد و در مرحله دوم، این مکان‌ها از نظر معیارهای کیفی نظیر عوامل فنی، اقتصادی، محیطی و اجتماعی سیاسی مورد اولویت بندی قرار گرفتند. نتایج پیشنهاد دهنده نواحی داغ در کشور مذکور جهت نصب نیروگاه‌های خورشیدی با هدف صرفه‌جویی در هزینه‌ها و منابع را در آن کشور دارد.

### ۳- روش شناسی تحقیق

تنظیمات سیستم فتوولتائیک در نواحی مختلف دارای خصوصیات خاص خود است. به صورت کلی، دما، سرعت باد و رطوبت نسبی در مدل‌ها در نظر گرفته می‌شود. تابش روی یک سطح کج برای یک سیستم متحرک با توجه به زاویه شیب محاسبه می‌شود. علاوه بر این، دما بر اساس تئوری انتقال گرما و سیستم خنک‌کننده طبیعی برای سیستم فتوولتائیک تخمین زده می‌شود. نوآوری اصلی این تحقیق، بکارگیری سیستم فتوولتائیک در یک شرایط جوی ناپایدار در منطقه کوهستانی در استان

<sup>۱</sup> Angereb

<sup>۲</sup> Rib

<sup>۳</sup> Koga

<sup>۴</sup> Bentouba, et al.

<sup>۵</sup> Wang et al.

<sup>۶</sup> Data envelopment analysis

<sup>۷</sup> Grey Based Multiple Criteria Decision Making

کرمانشاه است. با توجه به این که آب و هوای شهر انتخابی برای استقرار سیستم بادی-خورشیدی در کوهستان، یک مسئله تامل برانگیز و پرچالش است که به صورت جدول (۱) خواهد بود.

جدول ۱. شرایط آب و هوایی محل مورد مطالعه

| فصل     | میانگین دما<br>(سانتیگراد) | میانگین دمای بالا<br>(سانتیگراد) | میانگین دمای پایین<br>(سانتیگراد) | میانگین<br>رطوبت |
|---------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| بهار    | ۱۵.۶                       | ۲۰.۴                             | ۱۰.۶                              | ۱۵               |
| تابستان | ۲۹                         | ۳۳                               | ۲۵                                | ۱۹               |
| پاییز   | ۱۷                         | ۲۴                               | ۷                                 | ۱۰               |
| زمستان  | ۳                          | ۱۲                               | ۲                                 | ۵                |

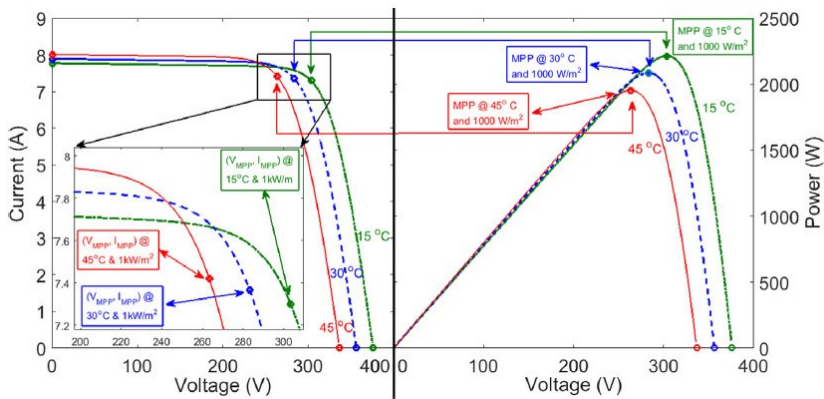
مأخذ: داده‌های هواشناسی

ضرورت و نوآوری انجام این تحقیق را می‌توان با مرور تحقیقات گذشته تبیین کرد. رویکرد پیشنهادی این تحقیق، علاوه بر لحاظ تغییرات اقلیمی و آب و هوایی در کارایی سیستم فتوولتائیک سعی در بررسی تجهیزات فتوولتائیک و مطالعه شرایط اقلیمی و آب و هوایی منطقه مورد مطالعه را دارد. در این راستا ساختار سیستم فتوولتائیک در ناحیه کوهستانی، با به کارگیری یک سیستم کنترلی مبتنی بر یادگیری عمیق<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار می‌گیرد.

این مقاله ساختار ترکیبی از AC/DC را برای بهره‌وری انرژی و تابش در منطقه کوهستانی ارائه می‌دهد تا کمترین خطا و بهترین مصرف انرژی را در یک میکروگرید فتوولتائیک به همراه داشته باشد. کنترل کننده MPPT ولتاژ تولید شده در پنل خورشیدی را در زمان واقعی تشخیص داده و بالاترین مقدار ولتاژ و جریان را نشان می‌دهد که با VI نشان داده می‌شود. ردیابی حداکثر نقطه توان یا MPPT اجازه می‌دهد که سیستم فتوولتائیک، باتری را با حداکثر کارایی شارژ کند. این یک جز بسیار مهم در سیستم‌های فتوولتائیک است که کار هماهنگی پنل‌های خورشیدی، باتری‌ها و بار را انجام می‌دهد. ردیابی حداکثر نقطه توان یک سیستم الکتریکی است که پانل فتوولتائیک را قادر می‌سازد با تنظیم حالت کارکرد مازول الکتریکی قدرت بیشتری تولید کند. برای شارژ باتری ولتاژ خروجی پانل خورشیدی باید از ولتاژ فعلی باتری بالاتر باشد. اگر ولتاژ پنل خورشیدی پایین تر از ولتاژ

<sup>۱</sup> Deep Learning

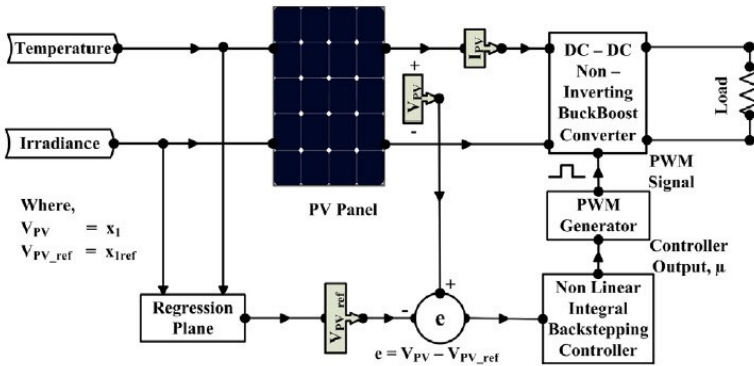
باتری باشد، جریان خروجی نزدیک به صفر خواهد بود. بنابراین به دلایل ایمنی، پانل خورشیدی در هنگام تولید دارای ولتاژ پیک ( $V_{pp}$ ) حدود ۱۷ ولت است که در دمای استاندارد ۲۵ درجه سانتیگراد تنظیم می‌شود. هنگامی که آب و هوا بسیار گرم است، ولتاژ  $V_{pp}$  پانل خورشیدی به حدود ۱۵ ولت کاهش پیدا می‌کند، اما در هوای سرد، ولتاژ پیل سوختی  $V_{pp}$  انرژی خورشیدی می‌تواند به ۱۸ ولت برسد که  $T_{PV}$  را مدنظر قرار می‌دهد کنترل کننده MPPT حداکثر نقطه قدرت را در پنل خورشیدی در زمان واقعی برای حداکثر کارایی پانل خورشیدی را نشان می‌دهد. ولتاژ بالاتر، قدرت بیشتر را می‌توان از طریق حداکثر ردیابی قدرت خروجی و در نتیجه بهبود بهره‌وری شارژ مشاهده کرد. در تئوری، سیستم انرژی خورشیدی با استفاده از کنترل کننده MPPT، بهره‌وری را ۵۰٪ بیشتر نسبت به سنتی افزایش می‌دهد. منحنی ویژگی‌های ماژول‌های سیستم فتوولتائیک در شکل (۱) نمایش داده شده است.



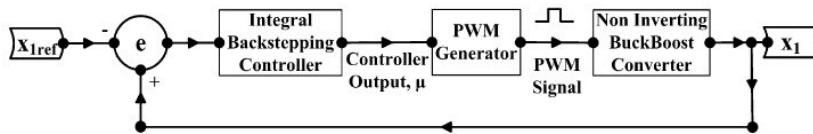
شکل ۱. ویژگی‌های ماژول‌های سیستم فتوولتائیک (ارسلان و همکاران، ۲۰۱۸)

سیستم پیشنهادی در این تحقیق برای بخش کنترل، از ارسلان و همکاران (۲۰۱۸) اقتباس شده است. در این تحقیق، درجه حرارت و رویداد تابش در ماژول فتوولتائیک لحاظ می‌شود و این اطلاعات را به بلوک صفحه رگرسیون ارائه می‌دهد که در شکل (۲) نشان داده شده است. سطح رگرسیون از رابطه ولتاژ نقطه توان حداکثر  $V_{MPP}$  و تابش-دما  $\{Radiance, Temperature\}$  برای ایجاد ولتاژ پیک ولتاژ مرجع  $V_{PVref}$  استفاده می‌کند که توسط کنترل کننده غیرخطی پیشنهاد شده قابل ردیابی است.

کنترل کننده با استفاده از مدل ریاضی مبدل Buckboost غیر معکوس مشتق شده و یک سیگنال خروجی  $\mu$  را تولید می‌کند که نسبت وظیفه سیگنال PWM را به سوئیچ‌های مبدل را کنترل می‌کند. یک سیستم حلقه بسته نیز وجود دارد که به صورت شکل (۳) است.



شکل ۲. روش کنترل پیشنهادی (ارسلان و همکاران، ۲۰۱۸)



شکل ۳. کنترل حلقه بسته (ارسلان و همکاران، ۲۰۱۸)

یک خطای سیگنالی مقایسه می‌شود که برای کنترل یکپارچه مدل پیشنهادی مبتنی بر یادگیری عمیق جهت بهره‌وری آگاه از انرژی و تابش عرضه می‌شود. این کنترل کننده به تولید ورودی کنترل  $\mu$  می‌پردازد که پهنای سیگنال PWM<sup>۱</sup> را کنترل می‌کند و مبدل را برای ردیابی ولتاژ مرجع هدایت می‌کند. هرگونه تغییر در درجه حرارت و یا تابش، مرجع جدید منحصر به فرد تولید خواهد کرد. در واقع، هر مجموعه‌ای از مقادیر منحصر به فرد دما و تابش به تولید یک مرجع منحصر به فرد خواهد پرداخت. از اینرو، کارکرد ماژول فتوولتاییک در این ولتاژ مرجع اطمینان حاصل خواهد کرد که حداکثر توان

<sup>۱</sup> Pulse Width Modulation

توسط سیستم تولید می‌شود. نمودار ویژگی‌های سیستم فتوولتاییک برای هر مقدار خاص دما و تابش تغییر می‌کند. یک تغییر جزئی در هر یک از آن‌ها منجر به ایجاد یک منحنی جدید می‌شود و از اینرو MPP را تغییر می‌دهد، همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است. برای هر سطح دما و تابش، ولتاژ پیک قدرت  $V_{PVR}$  یا  $V_{MPP}$  را می‌توان به صورت رابطه (۱) محاسبه کرد.

$$V_{MPP} = 332 - 1.34 \times T - 0.00964 \times I + T_{PV} \quad (1)$$

با توجه به رابطه (۱)،  $T$  دما و  $I$  تابش است. کنترل‌کننده پیشنهادی مبتنی بر یادگیری عمیق برای بخش فتوولتاییک ارائه می‌شود. وظیفه اصلی الگوریتم کنترلی مبتنی بر یادگیری عمیق این است که مشتق شده از قدرت خروجی فتوولتاییک با توجه به ولتاژ عملکرد آن که  $dP/dV$  است را پیدا کند. حداکثر توان فتوولتاییک هنگامی که فتوولتاییک نزدیک به صفر باشد، به دست می‌آید. کنترل‌کننده  $dP/dV$  را بر اساس اندازه‌گیری توان و ولتاژ خروجی فتوولتاییک افزایش می‌دهد. اگر  $dP/dV$  به طور فزاینده صفر نباشد، کنترل‌کننده می‌تواند به تنظیم نقطه ولتاژ فتوولتاییک به صورت نقطه ای تا زمانی که  $dP/dV$  نزدیک به صفر است و در آن آرایه فتوولتاییک به حداکثر توان خود برسد، پردازد. مزیت اصلی این الگوریتم در روش P&O فرایند ردیابی قدرت سریع آن است. با این حال، این ناکارآمد بودن بی‌ثباتی ممکن است به دلیل استفاده از الگوریتم مشتق شده باشد. علاوه بر این، روش تمایز در سطوح پایین انسداد امری دشوار است و نتایج آن ممکن است کافی نباشد. از آن جایی که فتوولتاییک آرایه نشان دهنده یک ویژگی غیر خطی فعلی ولتاژ یا ولتاژ قدرت است، نقطه حداکثر توان یا MPP آن با دما تغییر می‌کند که این مسئله در ناحیه مورد مطالعه این تحقیق یعنی در ناحیه کوهستانی نیز وجود دارد. بعضی از الگوریتم‌ها مانند منطق فازی یا کنترل شبکه‌های عصبی مصنوعی و تطبیقی در طبیعت، کنترل فتوولتاییک را تطبیق داده‌اند. سیستم استنتاج منطق فازی، تابع‌ها را به صورت یک مدل جعبه سیاه<sup>۱</sup> مدنظر قرار می‌دهد و نیازی به اطلاعات دقیق در مورد سیستم فتوولتاییک ندارد. پس از بررسی رابطه بین ولتاژ حداکثر و مدار باز یا انزوا و درجه حرارت، کنترل مبتنی بر یادگیری عمیق می‌تواند نقطه حداکثر توان یا MPP را در خط پیگیری کند. به منظور ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده مبتنی بر یادگیری عمیق، یک ماژول PV با حداکثر توان ۱۲۷۳ وات پیک، و جریان اتصال کوتاه

<sup>۱</sup> Black Box

( $SCC^1$ ) ۲۵.۴۴ A و ولتاژ مدار باز ۶۶V ( $VOC^2$ ) در استاندارد اشعه ( $G = 1000 \text{ w} / \text{m}^2$ ) و درجه حرارت (NOCT) شرایط آزمایش ۲۵ درجه سانتیگراد با افزایش چرخه افزایش  $(C^1=C^2=2000 \text{ Mf}, L=10 \text{ Mh})$  مدنظر قرار می‌گیرد. ورودی‌های کنترل‌کننده برای بخش یادگیری عمیق به صورت  $E$  و  $dE = \frac{V}{I}$  هستند. تغییر در توزیع چرخه کار  $dD$  خروجی است. بهینه‌سازی با یادگیری عمیق یک تکنیک جستجوی انطباق‌پذیر است که شامل تولید، ارزیابی سیستماتیک و پالایش راه‌حل بالقوه تا زمانی که معیار متوقف شدن برآورده شود.

ساختار مورد نظر این تحقیق به عنوان یک رویکرد بهینه در یادگیری عمیق، شبکه عصبی حافظه کوتاه مدت طولانی مبتنی بر پولینگ هر می فضایی آتروس (ASPP) است که به صورت LSTM-ASPP خواهد بود. لذا بررسی دو شبکه عصبی عمیق، لازمه کار است. با استفاده از لایه‌های پیچش و پولینگ در یادگیری عمیق به نام LSTM-ASPP، روند آموزش جهت تولد نسل‌های بعدی در یک در تکرار مشخص انجام می‌شود. مراحل اجرای یادگیری عمیق جهت بهبود کنترل‌کننده برای MPPT در سیستم فتوولتاییک به صورت گام‌های ذیل است:

- ✓ مرحله ۱: تعدادی از ماژول‌های متصل، مدل انزوا و درجه حرارت برای هر ماژول را مدنظر قرار می‌گیرد. در واقع خروجی سیستم فتوولتاییک، ورودی الگوریتم یادگیری عمیق خواهد بود.
- ✓ مرحله ۲: تعریف تابع هدف و شناسایی پارامترها.
- ✓ مرحله ۳: ایجاد نرون‌ها.
- ✓ مرحله ۴: جمع‌آوری داده‌ها و ارزیابی با تابع هدف.
- ✓ مرحله ۵: بررسی همگرایی (اگر شرایط برآورده‌کننده باشد، توقف و در غیر این صورت سایر مراحل).
- ✓ مرحله ۶: با استفاده از لایه‌های پیچش و پولینگ در یادگیری عمیق، روند آموزش جهت تولد نسل‌های بعدی در یک در تکرار مشخص انجام می‌شود.

<sup>۱</sup> Short circuit current

<sup>۲</sup> Open circuit voltage

✓ مرحله ۷: تکامل نسل جدید و برگشت به مرحله ۳.

در این مدل، سه نرون با چهار زیر لایه برای هر کدام لحاظ می‌شود که نرون‌های  $E$ ،  $CE$  و  $dD$ ، هر نرون از مجموعه‌ای از خروجی‌های سیستم فتوولتائیک تشکیل شده است. در این تحقیق سعی بر آن است که تا توابع بهینه با استفاده از الگوریتم یادگیری عمیق پیدا شود و این کار با مراحل زیر انجام می‌شود:

انتخاب معیار بهینه‌سازی: در این کار از معیار درجه دوم استفاده می‌شود تا به حداقل برسد که به صورت استفاده از رابطه (۲) می‌باشد که این انتخاب برای بهبود زمان پاسخ و کاهش نوسانات انجام شده است.

$$J = \int e^2 dt \quad , \quad e = P_{max} - P \quad (2)$$

۲. ایجاد نرون‌ها در لایه ورودی:

نرون‌ها شامل مجموعه‌ای از ورودی‌ها در لایه ورودی است که هر نرون از سه بخش در لایه‌های آموزش و آزمون تشکیل شده است که به صورت ذیل می‌باشد:

✓ نرون‌های  $E$ ،  $CE$  و  $dD$ ، هر نرون از مجموعه‌ای از خروجی‌های سیستم فتوولتائیک تشکیل شده است.

✓ برای نرون  $E$ ، خروجی‌های سیستم فتوولتائیک عبارتند از  $C^1$ ،  $C^2$ ،  $C^3$ ،  $C^4$ .

✓ برای نرون  $CE$  خروجی‌های سیستم فتوولتائیک عبارتند از  $C^1$ ،  $C^2$ ،  $C^3$ ،  $C^4$ .

✓ برای نرون  $dD$  خروجی‌های سیستم فتوولتائیک عبارتند از  $C^1$ ،  $C^2$ ،  $C^3$ ،  $C^4$ .

طیفی از تغییرات  $C$ ،  $C'$ ،  $C''$  که فضای جستجو است، تعریف شده است؛ که بین [۰.۹۹۰.۰۱] متفاوت است. ارتباطات بین  $C_i$ ،  $C'_i$ ،  $C''_i$  و  $x_i$ ،  $y_i$ ،  $z_i$  به صورت رابطه (۳) است.

$$\left( \begin{array}{l} x_1 = (C4 + C3) \cdot 0.032 \\ x_r = C3 \cdot 0.032 \\ x_p = C1 \cdot 0.032 \\ x_f = (C_1 + C_r) \cdot 0.032 \\ y_1 = (C4 + C3) \cdot 100 \\ y_r = C3 \cdot 100 \\ y_p = C1 \cdot 100 \\ y_f = (C1 + C2) \cdot 100 \\ z_1 = (C'4 + C'3) \cdot 0.032 \\ z_r = C'3 \cdot 0.032 \\ z_p = C''1 \cdot 0.032 \\ z_f = (C1 + C2) \cdot 0.032 \end{array} \right) \quad (3)$$

برای پیدا کردن راه حل فردی (فرد بهینه)، هر نرون محدود به جستجوی مقادیر خروجی‌های سیستم فتولتاییک که ناشناخته هستند، محدود می‌کند. برای رسیدن به مقدار بهینه سراسری، یک جمعیت بزرگ جمعیت برابر ۱۰۰ نرون در نظر گرفته می‌شود. سپس عملگرهای الگوریتم عمیق طبق توضیحات پایه اعمال می‌گردند. معیار توقف باید مدنظر قرار بگیرد. معیار توقف زمانی است که حداکثر تعداد نسل به ۵۰ می‌رسد. کارایی و تاثیر  $\eta$  الگوریتم با استفاده از معادله (۴) محاسبه می‌شود.

$$\eta = \frac{\int_{t1}^{t2} P dt}{\int_{t1}^{t2} P_{max} dt} \quad (4)$$

طبق رابطه (۴)،  $t1$  و  $t2$  آغازگر با طلوع خورشید و زمان خاموش شدن سیستم یا غروب خورشید است و همین‌طور راه افتادن بهره‌وری انرژی با سیستم بادی است،  $P$  قدرت کارایی ردیف است، و  $P_{max}$  حداکثر قدرت نظری فتولتاییک است.

#### ۴- شبیه‌سازی و یافته‌ها

شبیه‌سازی در محیط نرم افزار متلب و با استفاده از Simulink ساخته شده است. پارامترهای سیستم پیشنهادی مبتنی بر یادگیری عمیق و تبدیل‌کننده‌ها در جدول (۲) لیست شده‌اند. همچنین در جدول (۳)، پارامترهای آرایه فتولتاییک مورد استفاده در تحقیق مدنظر قرار گرفته‌اند. شکل (۴) روند سیستم فتولتاییک برای شناسایی عوامل هوشمند و فناوری‌گذار در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر جهت بهره‌وری آگاه از انرژی و تابش را نشان می‌دهد.

جدول ۲. پارامترهای سیستم پیشنهادی مبتنی بر یادگیری عمیق و تبدیل‌کننده‌ها

| مقدار      | پارامتر                  |
|------------|--------------------------|
| ۲۸۷۰.۱۸    | $k_1$                    |
| ۱۵۵۱.۶۵    | $k_2$                    |
| ۱۵۱۰       | $k$                      |
| $۶۷\mu f$  | $C_{In1}$ خازن ورودی یا  |
| $۱۱mH$     | $L$ القاگر یا            |
| $۴۸۰\mu F$ | $C_{Out1}$ خازن خروجی یا |
| $۲۰\Omega$ | $R$ بار مقاومت یا        |
| $۱۰۰kHz$   | $f_s$ فرکانس سوئیچینگ یا |

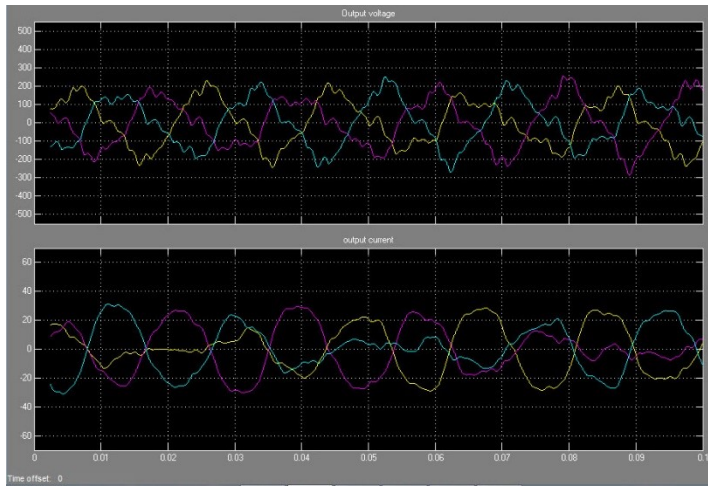
مأخذ: یافته‌های تحقیق

جدول ۳. پارامترهای آرایه فتوولتائیک و ساختار تبدیل‌کننده توان الکترونیکی در آن

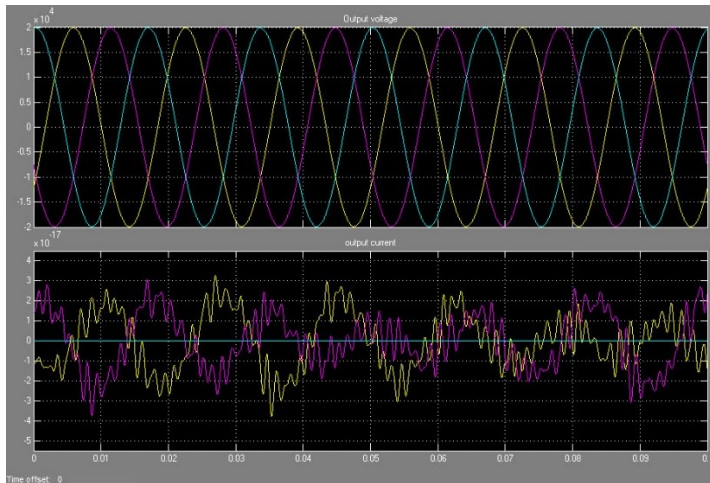
| مقدار     | پارامتر                       |
|-----------|-------------------------------|
| ۱۰        | ماژول فتوولتائیک برای هر رشته |
| ۱         | رشته‌های متصل موازی           |
| ۶۰        | تعداد سلول‌ها برای هر ماژول   |
| $۳۶۳V$    | ولتاژ مدار باز                |
| $۷.۸۴A$   | جریان مدار کوتاه              |
| $۲۹۰V$    | MPP ولتاژ در                  |
| $۷.۳۵A$   | MPP جریان در                  |
| $۲۱۳.۱۵W$ | حداکثر توان در هر ماژول       |

مأخذ: یافته‌های تحقیق





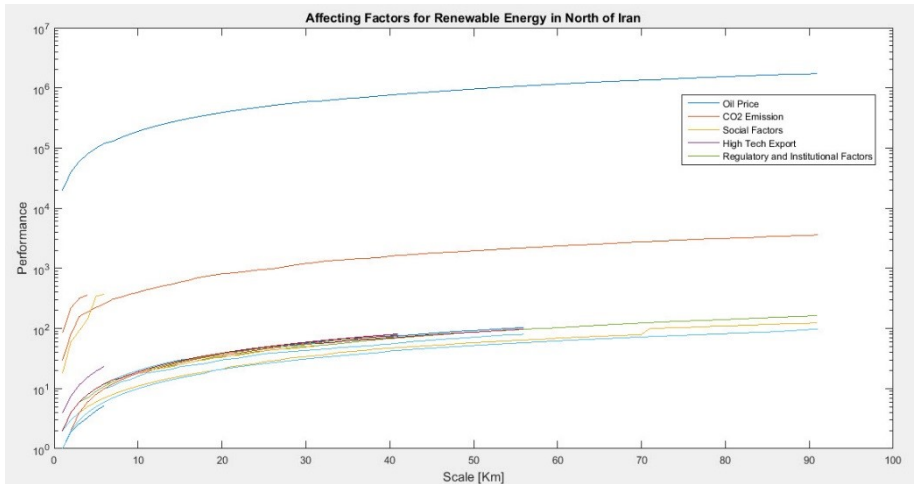
شکل ۶. ولتاژ خروجی و جریان خروجی



شکل ۷. ولتاژ خروجی و جریان خروجی

بر اساس الگوریتم یادگیری عمیق، شناسایی عوامل هوشمند و تاثیرگذار در انرژی تجدید پذیر فتولتاییک برای شرایط اقلیمی ایران در استان کرمانشاه باید مدنظر قرار گیرد. مسلماً ناحیه استقرار فتولتاییک در مناطق مختلف با هم متفاوتند. به طور مثال، محیط مناسب استقرار صفحات خورشیدی

فتوولتاییک در ایران می‌تواند در مناطق کویری و یا دریایی باشد، در صورتی که استقرار توربین‌های بادی در مناطق کوهستانی و در ارتفاعات است. شبیه‌سازی کلی در محیط نرم افزار متلب مبتنی بر الگوریتم یادگیری عمیق برای شناسایی عوامل هوشمند و تاثیرگذار در انرژی تجدید پذیر فتوولتاییک انجام شد. قیمت نفت، صادرات فناوری بالا، معیار محیطی انتشار گاز کربن دی اکسید، معیارهای اجتماعی و معیارهای نظارتی و نهادی به عنوان اصلی ترین ویژگی ها در این حوزه مدنظر قرار می‌گیرد. زمانی که شبیه سازی انجام می شود، ابعاد ۱۰۰ کیلومتر برای استقرار این انرژی های تجدید پذیر مدنظر قرار می‌گیرد که کارایی بر روی آن با استفاده از الگوریتم یادگیری عمیق با هدف بهبود تابش و انرژی جهت بهره وری انرژی و کاهش هزینه ها، مورد سنجش قرار می‌گیرد. نتیجه شبیه سازی به صورت شکل (۷) است.



شکل ۷. نتیجه اعمال رویکرد پیشنهادی برای شناسایی عامل هوشمند و فناوری های تاثیر گذار در انرژی های تجدید پذیر فتوولتاییک

مشاهده می‌شود که مهمترین عامل، هزینه نفت با نمودار آبی رنگ است. در ادامه انتشار گاز کربن دی اکسید با نمودار قرمز رنگ، سپس صادرات فناوری بالا با رنگ بنفش و در ادامه رنگ سبز برای معیارهای نظارتی و نهادها و در انتها معیارهای اجتماعی با نمودار نارنجی رنگ، به ترتیب به عنوان معیارهای مهم و تاثیرگذار برای استفاده از انرژی های تجدید پذیر فتوولتاییک هستند. نتایج میانگین

بهره وری روزانه برای الگوریتم‌های  $IC^1$  و P&O در جدول (۴) خلاصه شده است و همچنین به صورت مستقیم اتصال بار به سیستم فتوولتائیک مدنظر واقع شده است.

جدول ۴. مقایسه میانگین بهره وری روزانه برای الگوریتم‌های MPPT در سیستم فتوولتائیک

| الگوریتم‌های MPPT | میانگین بهره وری روزانه |
|-------------------|-------------------------|
| بدون MPPT         | ٪ ۳۱.۳                  |
| P&O               | ٪ ۸۱.۵                  |
| I&C               | ٪ ۸۹.۹                  |
| FLC               | ٪ ۹۰.۵۲                 |
| رویکرد پیشنهادی   | ٪ ۹۶/۵۱                 |

مأخذ: یافته‌های تحقیق

در انتها یک مقایسه از لحاظ کارایی برای طول عمر باتری‌ها شامل  $RT^2$  برحسب میلی ثانیه، معیار  $ST^3$  ۵٪ برحسب میلی ثانیه، معیار  $ST$  ۲٪ برحسب میلی ثانیه،  $SSE^4$ ، بیش از حد  $^5$  و ریبِل  $^6$ ، با روش‌های پیشین انجام گرفته است که نتایج آن در جدول (۵) ارائه شده است.

<sup>۱</sup> Incremental Conductance

<sup>۲</sup> Replacement Tool

<sup>۳</sup> Statistical tolerance

<sup>۴</sup> Stationary Source Enforcement

<sup>۵</sup> Overshoot

<sup>۶</sup> Ripples

جدول ۵. مقایسه معیارها بین روش‌ها

| Ripples (V) | Overshoot (V) | SSE (V) | ST ۲% (ms) | ST ۰% (ms) | RT (ms) | روش             |
|-------------|---------------|---------|------------|------------|---------|-----------------|
| ۱۹          | ۷۴            | ۶       | NA         | ۱۹         | ۲.۲۲    | P&O             |
| ۰.۶۳        | ۱۳.۹۴         | ۰       | ۳.۲        | ۲.۹        | ۲.۱۷    | I&C             |
| ۰.۶۵        | ۰             | ۱       | ۳.۸        | ۳.۱        | ۲.۴۲    | FLC             |
| ۰.۲۸        | ۰             | ۱       | ۴          | ۳.۸        | ۲.۴۵    | رویکرد پیشنهادی |

مأخذ: یافته‌های تحقیق

در استفاده از سیستم فتوولتائیک در مورد اتصال بار مستقیم، به دلیل تفاوت بار، می‌تواند به طور قابل توجهی با استفاده از MPT بهبود یافته است. افزایش بهره وری توسط الگوریتم IC به دلیل توانایی آن در پیشگیری از معایب الگوریتم P&O، یعنی پس از تغییرات جوی سریع و اجتناب از نوسانات اطراف MPP است. معمولاً در طراحی سیستم فتوولتائیک، ورود MPPT به اندازه سیستم و ویژگی‌های بار بستگی دارد. زیرا به دست آوردن بهره وری انرژی که توسط MPPT به دست می‌آید باید با افزایش هزینه سیستم تعادل داشته باشد. بهره وری بالاتر از الگوریتم IC، سودآوری بیشتری نسبت به الگوریتم P&O را به ارمغان می‌آورد.

### ۵- نتیجه گیری

این تحقیق به استفاده از یک ساختار فتوولتائیک با الگوریتم یادگیری عمیق پرداخته شده است. شبیه‌سازی عملکرد سیستم در محیط MATLAB-Simulink انجام شده است. نتایج حاکی از بهبود در عملکرد سیستم فتوولتائیک با حداقل نوسان ولتاژ ترکیبی AC/DC و ردیابی سریع نقطه عملیاتی بهینه را نشان می‌دهد. ضمناً سهم عوامل مهم تاثیرگذار بر تولید انرژی تجدیدپذیر در انتشار کربن دی‌اکسید (به عنوان شاخص عوامل محیطی)، درآمد و قیمت نفت (به عنوان شاخص عوامل اقتصادی) و همین‌طور عوامل دیگری هم چون صادرات فناوری بالا، معیارهای نظارتی و نهادها و معیارهای اجتماعی می‌تواند قابل ملاحظه باشد. این مطالعه با هدف بررسی تاثیر عامل فنی، زیرساختی و نوآوری، به عنوان عاملی که در سال‌های اخیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌شود، با در نظر گرفتن یک منطقه خاص از ایران در مناطق کوهستانی استان کرمانشاه با آب و هوای سرد و خشک برای استفاده و استقرار

انرژی‌های تجدیدپذیر فتوولتاییک مورد توجه قرار بوده است. استفاده از یک الگوریتم بهینه یادگیری عمیق می‌تواند با در نظر گرفتن عوامل هوشمند و تاثیرگذار در استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، مدنظر قرار گیرد. مقایسه بین رویکرد پیشنهادی از لحاظ میانگین بهره‌وری روزانه با سایر روش‌ها شامل IC، P&O و FLC انجام گرفته است که بهره‌وری انرژی و تابش برای رویکرد پیشنهادی مبتنی بر یادگیری عمیق را نشان می‌دهد. از لحاظ سایر معیارهای ارزیابی شامل RT، ST، SSE، Overshoot و Ripples نیز رویکرد پیشنهادی مبتنی بر یادگیری عمیق دارای برتری عملکردی نسبت به روش‌های دیگر است.

نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به سیاستگذاران بخش انرژی کشور اولاً در تعیین محل بهینه برای استقرار نیروگاه‌های خورشیدی در مناطق کوهستانی مفید باشد. شناخت حالات طبیعی و احتمال آنها برای بررسی عوامل هوشمند و تاثیرگذار، امری قابل توجه در کشوری به وسعت ایران با مناطق آب و هوایی متنوع است که مقایسه خروجی استقرار در بیابان، دریا و یا کوهستان می‌تواند در بهره‌وری انرژی تولیدی نیروگاه با اهمیت باشد. لذا توصیه می‌شود با توجه به تنوع اقلیمی و موقعیت‌های جغرافیایی مناطق مختلف کشور، شیبه‌سازی برای مناطق مستعد بدقت انجام گردد.

## منابع

- Alaeddin, M. H., Sapuan, S. M., Zuhri, M. Y. M., Zainudin, E. S., & Al-Oqla, F. M. (۲۰۱۹). Photovoltaic applications: Status and manufacturing prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, ۳۱۸-۳۳۲.
- Aldair, A. A., Obed, A. A., & Halihal, A. F. (۲۰۱۸). Design and implementation of ANFIS-reference model controller based MPPT using FPGA for photovoltaic system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, ۲۲۰۲-۲۲۱۷.
- Arsalan, M., Iftikhar, R., Ahmad, I., Hasan, A., Sabahat, K., & Javeria, A. (۲۰۱۸). MPPT for photovoltaic system using nonlinear backstepping controller with integral action. *Solar Energy*, 170, ۱۹۲-۲۰۰.
- Bentouba, S., Bourouis, M., Zioui, N., Pirashanthan, A., & Velauthapillai, D. (۲۰۲۱). Performance assessment of a ۲۰ MW photovoltaic power plant in a hot climate using real data and simulation tools. *Energy Reports*, 7, ۷۲۹۷-۷۳۱۴.
- Cheddadi, Y., Errahimi, F., & Es-sbai, N. (۲۰۱۸). Design and verification of photovoltaic MPPT algorithm as an automotive-based embedded software. *Solar Energy*, 171, ۴۱۴-۴۲۰.

Cupertino, A. F., Xavier, L. S., Brito, E. M., Mendes, V. F., & Pereira, H. A. (۲۰۱۹). Benchmarking of power control strategies for photovoltaic systems under unbalanced conditions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 106, ۳۳۰-۳۴۰.

Debastiani, G., Nogueira, C. E. C., Acorci, J. M., Silveira, V. F., Siqueira, J. A. C., & Baron, L. C. (۲۰۲۰). Assessment of the energy efficiency of a hybrid wind-photovoltaic system for Cascavel, PR. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, ۱۱۰۰۱۳.

Gholami, A., Ameri, M., Zandi, M., Ghoachani, R. G., Eslami, S., & Pierfederici, S. (۲۰۲۰). Photovoltaic potential assessment and dust impacts on photovoltaic systems in Iran. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 10(۳), ۸۲۴-۸۳۷.

Golroodbari, S. Z., & van Sark, W. (۲۰۲۰). Simulation of performance differences between offshore and land-based photovoltaic systems. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, ۲۸(۹), ۸۷۳-۸۸۶.

Hernández-Callejo, L., Gallardo-Saavedra, S., & Alonso-Gómez, V. (۲۰۱۹). A review of photovoltaic systems: Design, operation and maintenance. *Solar Energy*, 188, ۴۲۶-۴۴۰.

Husain, A. A., Hasan, W. Z. W., Shafie, S., Hamidon, M. N., & Pandey, S. S. (۲۰۱۸). A review of transparent solar photovoltaic technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 94, ۷۷۹-۷۹۱.

Jia, Y., Alva, G., & Fang, G. (۲۰۱۹). Development and applications of photovoltaic-thermal systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, ۲۴۹-۲۶۰.

Jouda, A., Elyes, F., Rabhi, A., & Abdelkader, M. (۲۰۱۷). Optimization of scaling factors of fuzzy-MPPT controller for stand-alone photovoltaic system by particle swarm optimization. *Energy Procedia*, 111, ۹۰۴-۹۶۳.

Karpouzoglou, T., Vlaswinkel, B., & Van Der Molen, J. (۲۰۲۰). Effects of large-scale floating (solar photovoltaic) platforms on hydrodynamics and primary production in a coastal sea from a water column model. *Ocean Science*, 16(۱), ۱۹۰-۲۰۸.

Kiermasch, D., Gil-Escrig, L., Bolink, H. J., & Tvingstedt, K. (۲۰۱۹). Effects of masking on open-circuit voltage and fill factor in solar cells. *Joule*, 3(۱), ۱۶-۲۶.

Kihal, A., Krim, F., Laib, A., Talbi, B., & Afghoul, H. (۲۰۱۹). An improved MPPT scheme employing adaptive integral derivative sliding mode control for photovoltaic systems under fast irradiation changes. *ISA transactions*, 87, ۲۹۷-۳۰۶.

Li, X., Wen, H., Hu, Y., & Jiang, L. (۲۰۱۹). A novel beta parameter based fuzzy-logic controller for photovoltaic MPPT application. *Renewable energy*, 130, ۴۱۶-۴۲۷.

Lian, X., Pang, Y., Han, J., & Pan, J. (۲۰۲۱). Cascaded hierarchical atrous spatial pyramid pooling module for semantic segmentation. *Pattern Recognition*, 110, ۱۰۷۶۲۲.

McGee, J. A., & Greiner, P. T. (۲۰۱۹). Renewable energy injustice: The socio-environmental implications of renewable energy consumption. *Energy Research & Social Science*, 56, ۱۰۱۲۱۴.

Moura, S. J., & Chang, Y. A. (۲۰۱۳). Lyapunov-based switched extremum seeking for photovoltaic power maximization. *Control Engineering Practice*, 21(۷), ۹۷۱-۹۸۰.

- Nebey, A. H., Taye, B. Z., & Workineh, T. G. (۲۰۲۰). GIS-based irrigation dams potential assessment of floating solar PV system. *Journal of Energy*, ۲۰۲۰.
- Olabi, A. G. (۲۰۱۹). Circular economy and renewable energy. *Energy*, 181, ۴۵۰-۴۵۴.
- Rahnama, E., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Khanali, M., & Rosen, M. A. (۲۰۱۹). Spatio-temporal solar exergoeconomic and exergoenvironmental maps for photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management*, 195, ۷۰۱-۷۱۱.
- Sampaio, P. G. V., González, M. O. A., de Vasconcelos, R. M., dos Santos, M. A. T., de Toledo, J. C., & Pereira, J. P. P. (۲۰۱۸). Photovoltaic technologies: Mapping from patent analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, ۲۱۵-۲۲۴.
- soufyane Benyoucef, A., Chouder, A., Kara, K., & Silvestre, S. (۲۰۱۵). Artificial bee colony based algorithm for maximum power point tracking (MPPT) for PV systems operating under partial shaded conditions. *Applied Soft Computing*, 32, ۳۸-۴۸.
- Tang, R. L., Wu, Z., & Fang, Y. J. (۲۰۱۷). Topological structure of large-scale photovoltaic array and its MPPT controlling method. *Energy Procedia*, 105, ۱۱۳-۱۱۸.
- Titri, S., Larbes, C., Toumi, K. Y., & Benatchba, K. (۲۰۱۷). A new MPPT controller based on the Ant colony optimization algorithm for Photovoltaic systems under partial shading conditions. *Applied Soft Computing*, 58, ۴۶۵-۴۷۹.
- Wang, C. N., Dang, T. T., & Wang, J. W. (۲۰۲۲). A combined Data Envelopment Analysis (DEA) and Grey Based Multiple Criteria Decision Making (G-MCDM) for solar PV power plants site selection: A case study in Vietnam. *Energy Reports*, 8, ۱۱۲۴-۱۱۴۲.