

فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی  
سال سوم / شماره ۷ / تابستان ۱۳۹۶ / صفحات ۱۳۶-۱۰۵

## تحلیل کیفیت سامانه فتوولتایک منعطف در سطوح منحنی

### مصطفی اسماعیلی شایان

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم- انرژی‌های تجدید پذیر،  
دانشگاه تربیت مدرس

[mostafa.esmaeili@modares.ac.ir](mailto:mostafa.esmaeili@modares.ac.ir)

### غلامحسن نجفی

دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس  
(نویسنده مسئول)

[g.najafi@modares.ac.ir](mailto:g.najafi@modares.ac.ir)

### احمد بنکار

دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس  
[ah\\_banakar@modares.ac.ir](mailto:ah_banakar@modares.ac.ir)

در این تحقیق، سامانه فتوولتایک بر پایه پنل‌های خورشیدی منعطف در مقیاس ۱ مترمربع معادل ۵۶ وات طراحی، ساخت و مورد ارزیابی قرار گرفت. سامانه‌های متدالو فتوولتایک امکان استفاده در سطوح منحنی را محدود می‌کنند. با توجه به اهمیت متغیرهای محیطی، سامانه سنجش دما برای دریافت پر خط داده‌ها و ارتباط با نرم‌افزار لب‌ویو طراحی و ساخته شد و داده‌های ایستگاه هواشناسی به دست آمد. تحلیل اقتصادی سامانه‌ها با استفاده از نرم‌افزار کامپیوتری آزمایشی تاگوچی با مشخصه هدف «هرچه توان بزرگر، بهتر» برای انتخاب سامانه برتر استفاده شد. نتایج نشان داد انعطاف‌پذیری سامانه فتوولتایک در سطح نیم کره می‌تواند سامانه را به هدف نزدیک‌تر کند و سامانه مستقر بر روی سطح استوانه و تخت به ترتیب رتبه‌های بعدی را دارند. مدل‌سازی طرح آزمایش‌های تاگوچی نشان داد چنانچه سامانه در سطوح انتخابی بر اساس بهینه فرآیند تولید و متغیرها مورد آزمون قرار گیرد، توان سامانه در حالت استقرار بر روی سطح تخت معادل  $53/30$  و سطح استوانه معادل  $54/05$  و سطح نیم کره معادل  $W/70$  می‌باشد. تحلیل اقتصادی سامانه‌ها نشان داد نرخ بازده داخلی در حالت استقرار بر روی سطح تخت، استوانه‌ای و نیم کره به ترتیب  $23/82$  و  $26/70$  و  $27/46$  درصد و خالص ارزش فعلی برابر با  $6/747$  و  $9/952$  و  $10/830$  میلیون ریال است. طرحها ضمن برخورداری از توجیه اقتصادی جهت جذب سرمایه به ترتیب، مستقر بر سطح نیم کره، استوانه و تخت رتبه‌بندی شدند.

**واژه‌های کلیدی:** فتوولتایک، پنل‌های خورشیدی منعطف، لب‌ویو، تاگوچی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۲۹

## ۱. مقدمه

امروزه با پیشرفت فناوری، انرژی تابشی خورشید مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌شود و این گام بزرگی در دریافت توان از خورشید است. با وجود این، هنوز تنها ۱ درصد از کل توان الکتریکی مورد نیاز انسان‌ها که معادل  $۱۸/۴۰۰$  تراوات ساعت می‌باشد، از طریق سلول‌های خورشیدی تأمین می‌شود (EPIA, 2015; IEA, 2015).

اهمیت انرژی و منابع مختلف تهیه آن، در حال حاضر در زمرة رویکردهای اصلی دولت‌های جهان قرار گرفته است. سوخت‌های فسیلی بخش عمده تأمین نیاز انرژی را به خود اختصاص داده‌اند (Kohjiro , et al., 2005). بزرگ‌ترین چشمۀ نشر گازهای گلخانه‌ای، بخش انرژی است و تأمین انرژی از سوخت‌های فسیلی بحران‌هایی برای محیط‌زیست به وجود آورده و میلیون‌ها تن گازهای گلخانه‌ای را به جو متصاعد می‌کند (Ekrami, et al., 2008). اغلب صنایع جهان زیرساخت‌های تأمین انرژی خود را با منابع سوخت‌های فسیلی (زغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی) طراحی کرده‌اند، اما سوخت‌های فسیلی منابع پایان‌پذیر هستند. بنابراین، بشر باید به دنبال منابع جایگزین برای تأمین انرژی مورد نیاز خود باشد (Kohjiro , et al., 2005). درحالی‌که شاخص شدت انرژی<sup>۱</sup> در ایران از سال ۱۳۵۳ تا ۱۳۷۳ از  $۱۰۰$  به  $۳۰۰$  رسیده است. میانگین شدت انرژی در جهان  $۴/۰$  و این رقم در ایران بیش از  $۰/۶$  می‌باشد (بی‌نام، ۱۳۹۵).

انرژی خورشیدی به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی‌های تجدیدپذیر به دو صورت گرمایی و توان الکتریکی پیشنهاد می‌گردد. کشورهای اروپایی برنامه‌ریزی کرده‌اند تا سال  $۲۰۳۰$  نزدیک به  $۵۰$  درصد از نیاز گرمایی کم‌شار خود را از طریق منابع گرمایی خورشیدی تأمین کنند

۱. شدت انرژی: مصرف انرژی بر حسب تن معادل نفت خام به ازای  $۱۰۰۰$  دلار تولید ناخالص ملی تعریف می‌شود.

(ESTTP, 2009)، اما فناوری فتوولتاییک با ظرفیت بالا می‌تواند تا سال ۲۰۳۰ سهم ۵ درصدی و تا سال ۲۰۵۰ سهم ۱۱ درصدی از نیاز الکتریکی در اروپا را بر عهده بگیرد (IEA, 2014). بالا رفتن مصرف انرژی، مضرات و محدودیت‌های سوخت‌های فسیلی، تمایل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و بویژه انرژی خورشیدی را افزایش داده است (محمودی و همکاران، ۱۳۹۰)، به گونه‌ای که در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ سرانه تولید انرژی جهانی افزایش یافته است (Zohoori, et al., 2012). پیش‌بینی شده است این افزایش در سال ۲۰۳۰ به بیش از ۶۰ درصد مقدار مصرفی در سال ۲۰۰۰ برسد (Solangi, et al., 2011). در تأمین انرژی‌های تجدیدپذیر و با توجه به ظرفیت موجود در کشور ایران، انرژی‌های خورشیدی به دلیل عدم تولید CO<sub>2</sub> دوستدار محیط‌زیست بوده و موجب حفظ منابع طبیعی، احیای اراضی، کاهش خطوط انتقال نیرو، افزایش استقلال منطقه‌ای در تأمین انرژی، افزایش سرعت برقرارسانی به مناطق روستایی شده و از هزینه کمتری برخوردار می‌باشد (Solangi, et al., 2011).

مطالعات پژوهشی نشان می‌دهد سالانه تعداد روزهای آفتابی در تهران ۳۱۳ روز و تعداد ساعت آفتابی در سال حدود ۱۷۴۲ ساعت می‌باشد. الگوی تغییر آن در کشور ایران از سمت جنوب شرقی به سمت شمال غربی در حال کاهش و از غرب به سمت شرق معمولاً در حال افزایش می‌باشد (رئوفی راد، ۱۳۸۵).

استفاده از اطلس تابش و بکارگیری مدل‌های ریاضی تابش نشان می‌دهد در بخش‌هایی از کشور ایران مانند یزد، کرمان، طبس، بیرون‌جند، ایرانشهر، چابهار، شیراز، بم، بوشهر و مناطق کویری شدت تابش در هوای صاف از ظرفیت بالا برخوردار است، اما طراحی ساختمان‌ها معمولاً اجازه استفاده از سامانه‌های متداول خورشیدی با پنل‌های غیرقابل انعطاف را نمی‌دهد (رئوفی راد، ۱۳۸۵). پنل‌های خورشیدی منعطف قادر به تولید ولتاژ بیش از ۵۰ ولت هستند. این مدارها می‌توانند تجهیزاتی را که در شرایط طبیعی نیاز به توان راهاندازی بالاتر دارند، تأمین ولتاژ کنند (Miles, et al., 2010).

طرح بیشتر بناهای مسکونی، کارگاهی، سیلوهای انبار غله، مخازن بیوگازسوز و گلخانه‌ها در حالت بهینه طراحی، بهمنظور تأمین انرژی و شرایط آسایش دارای اتحادهایی است، بنابراین، قابلیت استفاده از پنل‌های کریستالی معمول وجود ندارد. پنل‌های خورشیدی متداول برای نصب نیاز به سازه‌های فلزی دارد و معمولاً قابلیت تطابق با اشکال هندسی استوانه‌ای و کروی را بخوبی ندارند. برای حل این مشکلات، یکی از راه‌حل‌ها، طراحی و ساخت سامانه‌های خورشیدی بر پایه پنل‌های منعطف است که علاوه بر پذیرفتن شکل هندسی سازه‌های مورد نظر و حفظ قابلیت‌های قبلی، نیاز انرژی تجهیزات الکتریکی در این سازه‌ها را تأمین کند.

## ۲. مروری بر پژوهش‌های پیشین

از زمان شوک نفتی ۱۹۷۳، کشورهای توسعه‌یافته هزینه زیادی صرف تحقیق و توسعه فناوری‌های انرژی خورشیدی نموده‌اند. سهم سرمایه‌گذاری در زمینه انرژی خورشیدی به سمت فناوری‌های نسبتاً پیشرفته جهت‌گیری داشته است (Harendra, et al., 2013). تحقیق در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر در دهه‌های ۸۰ و ۹۰ میلادی تقریباً متوقف شد (GMO, 2016)، اما با نوسانات شدید قیمت نفت و گاز و همچنین خطر جدی گرمایش زمین به دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از سوخت‌های فسیلی، بار دیگر فناوری‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی در کانون توجه قرار گرفته است. در حال حاضر، بیش از ۴۵ درصد انرژی خورشیدی دنیا در کشور ژاپن تولید می‌شود، اروپا با ۲۵ درصد رتبه دوم و ایالات متحده آمریکا با ۱۹ درصد رتبه سوم را به خود اختصاص داده است (IEA, 2014). بیش از ۸۸ درصد بازار عرضه سلول‌های خورشیدی به نوع سیلیکون کریستالی اختصاص دارد (EPIA, 2015).

در سبد انرژی جهان، سهم خورشید در کشور ایران ناچیز است، اما سهم این انرژی در کشورهای توسعه‌یافته بیش از ۳۰ درصد است (ربیعی، ۱۳۹۱). در پایان سال ۲۰۱۴ ظرفیت فتوولتایک در جهان

به ۴۰ هزار مگاوات رسید. کشورهای امریکا، ایتالیا، ژاپن و اسپانیا کشورهای پیشرو در ظرفیت نصب شده انرژی خورشیدی در جهان هستند.

برقراری روزانه با استفاده از فتوولتایک در سال ۱۳۸۵ ابتدا از استان قزوین آغاز و سپس در استان‌های گیلان، زنجان، بوشهر، یزد و کردستان اجرا شد. در همین راستا، پروژه برقراری فتوولتایک به ۶۳۴ خانوار روزانه نیز در سال ۱۳۸۷ تعریف شد که ظرفیت این نیروگاه‌ها بیش از ۳۸۶ کیلووات است (بی‌نام، ۱۳۹۵، جوادی و همکاران، ۱۳۸۹).

نیروگاه‌های تجدیدپذیر در تأمین برق مصرفی کشور تقریباً سهمی ندارند و در این میان، انرژی خورشیدی بدترین شرایط را دارد. در میان ۳ نوع نیروگاه تجدیدپذیر نصب شده متصل به شبکه (بادی، بیوگازسوز و خورشیدی) نیروگاه‌های خورشیدی کمترین ظرفیت را دارند (صالحی قلعه سفید و همکاران، ۱۳۹۱). تقریباً تمام ظرفیت برق تجدیدپذیر که با روند کنونی ۱ تا ۳ سال به بهره‌برداری رسیده، از نوع بادی بوده است (شفیعی و همکاران، ۱۳۹۱).

در پژوهش هادجایسا و همکاران در حوزه سامانه خورشیدی فتوولتایک در گلخانه‌ها، الگوریتم کنترل و پایش سامانه خورشیدی بر اساس منطق فازی توانست روزانه ۱۶ مترمکعب را تا ارتفاع ۸ متر با مصرف ۵۵ تا ۲۵۰ وات توان، پمپ کند (Hadjaissa, et al., 2016). زمانی آقایی و همکاران از روش تحلیل آزمایش‌های تاگوجی در سامانه گرمکن خورشیدی با آرایه متعامد  $L_{16}$  (۴<sup>۴</sup>) استفاده کردند. این روش علاوه بر تشرییح رفتار ترموموکلرولیکی سیال در یک گرمکن خورشیدی، هندسه بهینه آشوبگر دندانه‌ای را برای رسیدن به هدف مشخص یعنی بهبود ضریب حرارتی تعیین کرد و مشخصه‌های اثرگذار معرفی شدند (زمانی آقایی و همکاران، ۱۳۹۴). مورات بر روی سامانه‌های انرژی هیبرید با استفاده از پنلهای منعطف نشان داد سامانه‌ها بخوبی می‌توانند علاوه بر تناسب و همراهی طرح آئرودینامیکی، نیاز موتورها و دستگاه‌های بی‌سیم را تأمین کنند (Murat, 2008). همچنین گرگ و همکاران در پژوهش بر عملکرد سامانه‌های بی‌شکل سیلیکون در مقیاس بزرگ،

استفاده از پنل‌های منعطف خورشیدی را مقرن بصرفه گزارش کردند (Gregg, et al., 2005). در پژوهشی با استفاده از نرم‌افزار کامپیوتری اقتصادی استفاده از انرژی خورشیدی (فتوولتاییک) و برق فسیلی مصارف خانگی در ایران مورد بررسی قرار گرفت، نتایج آن توجیه پذیری بکارگیری سامانه فتوولتاییک در مجتمع‌های مسکونی را با بازگشت سرمایه ۱۳ ساله نشان داد (مهدوی عادلی و همکاران، ۱۳۹۳).

شنکر و تامسون در سال ۲۰۱۲ برای اولین بار پس از بکارگیری سلول‌های آلی خورشیدی، پردازشگر OPV<sup>۱</sup> را طراحی و شدت تابش و سرعت باد را پردازش کردند (Schlenker and Thompson, 2012). مدورا و کوسو پیش‌تر نشان داده بودند متغیرهای دما و رطوبت بر سامانه خورشیدی، باتری‌های تر<sup>۲</sup> و مدارات الکتریکی تأثیرگذار است (Medora and Kusko, 2006). کوکوواس و همکاران بر روی انواع مبدل‌های آنالوگ و ارتباطدهی با نرم‌افزارهای مختلف در نرم‌افزارهای MATLAB و LabVIEW به منظور شبیه‌سازی و طراحی سامانه خورشیدی کار کردند. دقت اندازه‌گیری تحت حالت‌های مختلف در زمان واحد قابل داده کاوی بود و بین خروجی هر دو برنامه تطابق با همبستگی بسیار بالا ( $R^2 = 0.9996$ ) وجود داشت (Koukouvaos, et al., 2014). در پژوهش ۲۰ ساله در سال ۲۰۱۲ گزارش آزمون استاندارد تحلیل سامانه‌های خورشیدی در فضای باز، متغیرهای اصلی ارزیابی عملکرد سامانه فتوولتاییک پوست محور در حالت الکتریکی و حرارتی را معرفی کردند (Bloem, et al., 2012). هور و همکاران از روش طرح آزمایش‌های تاگوچی در سلول‌های خورشیدی رنگدانه حساس برای تعیین نمونه بهینه استفاده کردند. روش آزمایش‌های تاگوچی ضمن کاهش تعداد آزمایش‌های دقت مطلوب برای

#### 1.Organic Photovoltaics

<sup>۲</sup>بatterی‌هایی که دارای الکتروولیت مایع هستند.

#### 3.Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench

استخراج متغیرهای مؤثر در آزمایش و نیل به هدف مورد استفاده را به ارمغان داشت(هور و همکاران، ۱۳۹۱).

به رغم ذکر اهمیت استفاده سامانه‌های فتوولتاییک به عنوان بدن اشکال و اجسام، در هیچ پژوهشی سامانه‌های فتوولتاییک بر روی سطوح استوانه‌ای و کروی مورد ارزیابی قرار نگرفته‌اند. با وجود تحقیقات بسیار، متغیرهایی که منجر به تلفات توان در سامانه‌های منعطف خورشیدی می‌شوند، هنوز به طور کامل شناخته شده نیستند. استفاده از دیتالاگر و اتصال ورودی‌های آنالوگ به دیجیتال می‌تواند نقش مهمی در ارزیابی دقیق سامانه‌های خورشیدی داشته باشد.

در این تحقیق، سعی شده است با استفاده از روش‌های ارزیابی اقتصادی و اقتصاد مهندسی، هزینه واقعی استفاده از سامانه‌های خورشیدی منعطف بر روی سطوح تخت، نیم کره و استوانه‌ای محاسبه شده و مقرون‌بصره بودن استفاده از سامانه‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر بررسی گردد. برای این منظور از معیارهای NPV، IRR و PP استفاده شده است.

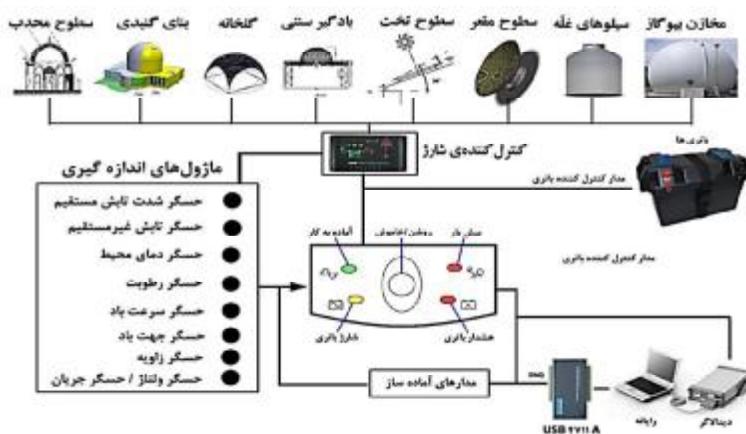
### ۳. مواد و روش‌ها

#### ۳-۱. تحلیل فنی

در این تحقیق، از سلول خورشیدی فتوولتاییک آ-س به عنوان مبدل تابش خورشیدی به الکتریسیته استفاده شد. سلول‌های منعطف با داشتن ضخامت و استحکام مناسب می‌توانند هر سازه‌ای را پوشش داده و با اتصال سری، توان بیشتری تولید کنند. با استفاده از آزمون در سطح صاف، آزمون بر روی سطوح استوانه‌ای و کروی اقدام به دریافت داده‌های ولتاژ و توان صورت گرفت. برای این منظور، سطح آزمون به میزان یک مترمربع و طراحی و ساخت سازه استوانه و کره انجام شد.

اجزای تشکیل‌دهنده سامانه تبدیل انرژی خورشیدی بر پایه پنل‌های منعطف مطابق شکل (۱) شامل سازه هندسی به شکل استوانه، نیم کره و صفحه تخت، ماژول منعطف خورشیدی، بانک باتری،

حسگر شدت تابش، حسگر دما، حسگر رطوبت، حسگر سرعت باد، ولت‌سنجه، توان‌سنجه، مدارهای آمده‌ساز، مدار و فیوزهای باتری، مبدل آنالوگ به دیجیتال و رایانه می‌باشد.



شکل ۱. طرح‌واره سامانه فتوولتاییک منعطف و تجهیزات کنترلی

در این تحقیق، مژاول فتوولتاییک منعطف JNPsolar3W-12v با مشخصات جدول

(۱) مورد استفاده قرار گرفت. المان فتوولتاییک آمورف سیلیکون خورشیدی فیلم نازک JNPsolar3W-12v با سه محل اتصال رسوب در بستر پلیمر ضدزنگ و دیود قفل برای جلوگیری از تخلیه جریان باتری به سمت پنل خورشیدی در مژاول به کار گرفته شد.

جدول ۱. مشخصات المان فتوولتاییک انعطاف‌پذیر JNPsolar3W-12v  
در شرایط استاندارد

مشخصه	واحد	مقدار	توضیحات
ابعاد	mm	۲۹۰×۲۱۰×۵	ضخامت، عرض، طول
توان در نقطه بیشینه	W	۳/۵	-
ولتاژ مدار باز	V	۱۴	-
جریان اتصال کوتاه	A	۰/۲۵	-
ولتاژ در نقطه بیشینه	V	۱۲	-
عملکرد	%	۸-۴	-

مأخذ: (JNP, 2016)

با توجه به ابعاد پنل، سطح آزمون معادل ۱ مترمربع انتخاب شد (Makrides, et al., 2012). با توجه به رابطه (۱) بهترین سطح برازش توسط مجموعه پنل‌های خورشیدی ۱ متر، معادل  $۹۴۴۴\text{ cm}^2$  و تعداد پنل‌های مورد استفاده ۱۶ عدد خواهد بود.

$$S_T = S_P \times N \quad (1)$$

در این رابطه،  $S_T$  معادل سطح مجموعه پنل‌ها و  $S_P$  معادل سطح کل یک پنل و  $N$  برابر تعداد پنل آزمون می‌باشد. تمام سطح پنل خورشیدی وظیفه فتوولتایک نداشته و حاشیه کناری به عنوان سطح نگهداری مورد استفاده قرار می‌گیرد. چنانچه این سطح از سطح کل آزمون ( $S_T$ ) حذف گردد، آنگاه سطح مؤثر فتوولتایک برابر است با:

$$S_t = S_T - N(S_P - S_c) \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $S_t$  معادل سطح فتوولتایک پنل و  $S_c$  معادل سطح حاشیه‌ای یک پنل آزمون می‌باشد. بنابراین، سطح فتوولتایک  $t$  مؤثر در روابط طراحی الکتریکی معادل  $۶۹۹۶\text{ cm}^2$  و سطح مؤثر در روابط طراحی هندسی سازه‌ها ( $S_T$ ) معادل  $۹۴۴۴\text{ cm}^2$  لحاظ شد.

برنامه پایشگر دما به زبان C و در نرم‌افزار Codevision نوشته شد و معروف‌ترین حسگر تشخیص دمای LM ۳۵ به عنوان حسگر تغییرات دما استفاده شد. این حسگر به ازای هر درجه سلسیوس ۱۰ میلی ولت ولتاژ خروجی را تغییر می‌دهد.

ارتباط میکروکنترلر با رایانه، از پورت RX و TX میکرو و ارتباط سریال انجام شد. مبدل آنالوگ به دیجیتال میکروکنترلر AVR به ازای ۰ تا ۵ ولت ورودی، عددی بین ۰ تا ۱۰۲۳ را تولید می‌کند. برای کالیبره کردن نسبت ولتاژ به دما در حسگر از رابطه (۳) استفاده شد.

$$Temp_x = \text{read\_adc}(0) \times 0.5 \quad (3)$$

چنانچه در رابطه (۳)  $Temp_x$  دما و X رابطه دما، تکرار شده برای سنجش دمای هر پنل خورشیدی منعطف می‌باشد.

در اتصال مژول دما از درگاه سریال RS232 و نرمافزار LabVIEW استفاده شد. این نرمافزار از زبان برنامه‌نویسی گرافیکی استفاده می‌کند که باعث سادگی کار شده است. دما به عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر در تولید توان سامانه فتوولتاییک منعطف باید به صورت دقیق مورد توجه قرار گیرد. میکروکنترلر، هر ۵۰ میلی ثانیه اطلاعات ۱۶ حسگر دما را از طریق ارتباط سریال ارسال می‌کند و پس از دریافت توسط LabVIEW آن را نمایش داده و هر ۳۰ دقیقه داده‌ها را در فایل اکسل با زمان واقعی ذخیره می‌کند.

بیشینه توان پنل خورشیدی از حاصل ضرب مقدار ولتاژ (در حالت مدار باز) در مقدار جریان (در حالت اتصال کوتاه) در ضریبی به بنام متغیر پوشش<sup>۱</sup> به دست می‌آید. متغیر پوشش به بیان ریاضی برابر قوس پوششی منحنی جریان – ولتاژ می‌باشد و هرچه مقدار آن به یک نزدیک باشد، به معنای کیفیت بالا در سامانه خورشیدی است. پنلهای فتوولتاییک JNPsolar3W-12V از نوع سیلیکون بی‌شکل (یا بی‌نظم) با اتصال سه گانه می‌باشد که بر روی لایه نازک پلیمر چسبانده شده‌اند. متغیر پوشش (FF) مطابق رابطه (۴) بر روی سطوح محاسبه گردید (اسحاقی و همکاران، ۱۳۹۴).

$$FF = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (4)$$

بهره‌وری سامانه فتوولتاییک یکی از مهم‌ترین متغیرهای ارزیابی در فضای باز می‌باشد. عملکرد (یا بهره‌وری) یا عملکرد عمومی (FF) از طریق رابطه (۵) محاسبه گردید (Matthew Gra, 2014).

---

1.Fill Factor(FF)

$$\eta = \frac{P/S_t}{I} \quad (5)$$

در رابطه فوق،  $\eta$  برابر مجموعه تابش بر روی سطح آرایه با واحد  $S_t/m^2$  و  $P$  برابر سطح آرایه فتوولتایک با واحد  $m^2$  و  $I$  برابر توان سامانه در نقطه دلخواه با واحد  $W$  می‌باشد. با استفاده از این رابطه شاخص بندی، محاسبه اتلاف توان در حالت سایه‌اندازی، تغییرات دمایی، افت گردخاک، بازتاب نور و تابش بر روی پنل خورشیدی صورت گرفت. برای رسم نمودارهای مربوط به منحنی عملکرد (بازده) و نمودارهای ولتاژ-جریان و همچنین تأثیر متغیرها بر توان، ولتاژ و جریان از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۳ و Minitab نسخه ۱۷/۳ استفاده شد.

در این پژوهش، تغییرات متغیرهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل برای هر سطح تماس به صورت جدا مورد ارزیابی قرار گرفته و نهایتاً توسط روش تاگوچی سامانه بهینه ارزیابی شده است. طرح آزمایش آرایه متعامد تاگوچی<sup>1</sup> سامانه منعطف خورشیدی با چهار متغیر، نهایتاً با ۱۸ آزمایش انجام شد. آرایه‌های متعامد آزمایش‌های تاگوچی برای طرح  $L_{18}(6^{13})$  عملکرد سامانه روی سطوح مختلف را ارزیابی کرد.

مرحله آزمون به سه قسمت، آزمون سطح صاف، آزمون سطح استوانه‌ای و آزمون در سطح کروی تقسیم می‌شود. نوع اتصال پنل‌های منعطف در سامانه به شکل سری بوده و سامانه جدا از شبکه برق محلی طراحی شده است. مرحله ارزیابی بر روی پشت‌بام ساختمان ۷ طبقه مسکونی واقع در استان تهران با ۳۵/۷۰ عرض جغرافیایی و ۵۱/۲۵ طول جغرافیایی برای هر سطح سه روز متوالی صورت گرفت. داده‌های محلی هواشناسی نزدیک سامانه توسط دستگاه‌های مختلف اندازه‌گیری و ثبت شدند. داده‌های مربوط به تابش برای هر یک از پنل‌ها عمود بر سطح توسط تابش نگار اندازه‌گیری شد.

---

1.Taguchi Orthogonal Array Design

همچنین داده‌های هواشناسی برای ۹ روز آزمون از ایستگاه هواشناسی مهرآباد (با فاصله کمتر از ۵ کیلومتر) دریافت شد.

### ۲-۳. تحلیل اقتصادی

ارزیابی عملکرد اقتصادی سامانه‌های منعطف خورشیدی با تأکید بر علم اقتصاد مهندسی صورت گرفته است. اقتصاد مهندسی در قالب تحلیل اقتصادی پروژه با بکارگیری روش‌های ریاضی و معیارهای کمی ارزیابی، به بررسی پروژه‌های مختلف سرمایه‌گذاری و انتخاب اقتصادی‌ترین آنها و یا تصمیم‌گیری جهت رد یا پذیرش اجرای پروژه خاص می‌پردازد (اسکونژاد، ۱۳۸۳). در این تحقیق، از نرم‌افزار کامفار نسخه ۳ استفاده شده است. معیارهای اقتصاد مهندسی مورد استفاده در آزمون عملکرد اقتصادی به شرح زیر می‌باشد.

#### معیار ارزش خالص فعلی<sup>۱</sup> (NPV)

این معیار با در نظر گرفتن تعدیل زمانی پول، تعادلی میان پرداخت‌های سرمایه‌گذاری و درآمدهای حاصل از اجرای سرمایه‌گذاری ایجاد می‌کند. ارزیابی این تعادل در مقایسه با نرخ بهره، استانداردی است که مدیریت طرح برای سرمایه‌گذاری و بکارگیری وجوده، از قبل تعیین نموده است. به این بهره، «حداقل بهره قابل جذب» یا «هزینه سرمایه» می‌گویند.

ارزش فعلی مجموعه‌ای از جریانات وجوده نقد آینده از طریق رابطه (۶) محاسبه می‌گردد:

$$NPV = NCF_0 + \frac{NCF_1}{(1+i)} + \frac{NCF_2}{(1+i)^2} + \frac{NCF_t}{(1+i)^t} \quad (6)$$

---

1.Net Present Value

در رابطه فوق،  $NPV$  برابر خالص ارزش فعلی،  $NCF$  برابر خالص وجوده نقد،  $\alpha$  برابر نرخ تنزيل و  $t$  برابر دوره مالی می باشد.  $NPV$  ممکن است یک عدد منفی (عدم انتخاب پروژه) یا یک عدد مثبت (انتخاب پروژه) باشد. همچنین در صورتی که خالص ارزش فعلی مساوی با صفر گردد، آنگاه طراح در انتخاب یا عدم انتخاب انجام پروژه بی تفاوت خواهد بود.

اگر محاسبات نشان دهد با اعمال نرخ تنزيل مشخص به عنوان حداقل نرخ جذب کننده سرمایه گذار، شاخص خالص ارزش فعلی برای یک پروژه با اعمال تورم، رقمی مثبت باشد، این امر نشاندهنده توجیه پذیر بودن پروژه است و همچنین اختلاف زیاد بین جریانات نقدی خروجی و ورودی پروژه و بزرگ بودن این شاخص، جذابیت سرمایه گذاری در پروژه را بیشتر می کند.

نسبت منفعت - هزینه

نسبت منفعت - هزینه در واقع نسبت مجموع ارزش فعلی در آمدهای حاصل از اجرای پروژه را به مجموع ارزش فعلی هزینه های حاصل از آن نشان می دهد که بیان دیگری از ارزش فعلی خالص پروژه ها می باشد.

معیار نرخ بازده داخلی (IRR)

$IRR^1$  معیار مشهوری در ارزیابی اقتصادی پروژه هاست و شرط پذیرش پروژه را بزرگتر بودن  $IRR$  از هزینه سرمایه<sup>2</sup> می داند.  $IRR$  نرخ تنزیلی است که بر اساس آن، ارزش خالص فعلی پروژه ( $NPV$ ) برابر صفر می شود. اگر  $NPV$  پروژه ای مثبت باشد،  $IRR$  آن پروژه از نرخ بازدهی که برای سرمایه گذاری به کار برد شده، بیشتر است. در محاسبه  $NPV$  فرض بر این است که نرخ تنزیل مشخص است و  $NPV$  پروژه تعیین می گردد. در محاسبه  $IRR$ ،  $NPV$  پروژه معادل صفر قرار گرفته و نرخ تنزیل که همان  $IRR$  پروژه است، تعیین شده است.

1.Internal Rate of Return  
2.Cost of Capital

**معیار دوره بازگشت سرمایه (PP)**

با استفاده از معیار دوره بازگشت سرمایه<sup>۱</sup> (PP)، دوره‌ای که در آن مجموع درآمدهای سالانه با هزینه سرمایه‌گذاری برابر (سرمه‌سرا) می‌شود، مشخص می‌گردد. PP روش تقریبی و ساده‌ای برای مقابله با ریسک بوده و به نفع پروژه‌هایی است که در سال‌های اولیه عایدات بیشتری دارند. به عبارت دیگر، هرچه این شاخص کوچکتر باشد، بیانگر سرعت بیشتر جبران جریانات نقدی خروجی به وسیله جریانات نقدی ورودی می‌باشد و لذا پروژه از جذایت بیشتری برای سرمایه‌گذاری برخوردار است. دوره بازگشت سرمایه شامل دوره بازگشت سرمایه عادی و متحرک می‌باشد. مفهوم دوره بازگشت سرمایه عادی عبارت است از خالص جریانات نقدی تجمعی طرح در مدت بهره‌برداری و منظور از دوره بازگشت سرمایه متحرک، این است که ارزش زمانی پول در محاسبه PP مدنظر قرار گرفته و محاسبات بر اساس داده‌های تنزیل شده صورت گرفته است.

به طور کلی، محصول تولیدی این پروژه، برق می‌باشد که سامانه‌های منعطف خورشیدی به اندازه ظرفیت اسمی تولیدی، برق تولید کرده، در باتری ذخیره و یا به شبکه برق سراسری منتقل می‌کنند. همچنین طول دوره ساخت پروژه شامل خرید و نصب تجهیزات، یک سال در نظر گرفته شده است. طول دوران بهره‌برداری یا عمر مفید سامانه‌ها معادل ۲۰ سال می‌باشد (وزارت نیرو، ۱۳۹۰). نرخ تورم در نظر گرفته شده در این بخش بر اساس متوسط میزان تورم در پنج سال اخیر بین سالهای ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵ مربوط به دسته کالاهای آب، برق و سوخت به طور متوسط ۱۰ درصد بوده که در این مطالعه نیز همین میزان در نظر گرفته شده است (بانک مرکزی، ۱۳۹۶).

آمار بانک مرکزی ایران نشان می‌دهد نرخ سود سپرده‌گذاری (سپرده‌های دیداری) بتازگی کاهش یافته و به ۱۵ درصد رسیده است، اما طی ۱۰ سال گذشته دارای میانگین ۱۶/۷ درصد بوده است که در این تحقیق به عنوان نرخ تنزیل معیار در نظر گرفته شده است (بانک مرکزی، ۱۳۹۶).

---

1. Payback Period

در این بررسی، ارزش گذاری اقلام هزینه و فایده بر پایه قیمت‌های بازار صورت گرفته و فرض شده است که این قیمت‌ها میان ارزش اجتماعی هزینه‌ها و فایده‌های پروژه هستند و اقلام فایده نیز شامل قیمت فروش برق تجدیدپذیر می‌باشد که تشکیل دهنده درآمد طرح مذکور است. طبق مصوبه مجلس شورای اسلامی، هر کیلووات برق تجدیدپذیر معادل ۸۰۰۰ ریال از مصرف کننده خریداری می‌شود که این قیمت برای ۲۰ سال عمر مفید سیستم خورشیدی در نظر گرفته شده است (ساتبا، ۱۳۹۵). بنابراین، سامانه‌های منعطف بر اساس عملکرد در شرایط بیشینه تولید توان می‌توانند درآمدی متفاوت در هر حالت استقرار روی سطوح مختلف مطابق با جدول داشته باشند.

**جدول ۲. فهرست هزینه‌های برق خورشیدی در سامانه‌ها بر روی سطوح مختلف**

درآمد فروش برق خورشیدی واحد (کیلووات ساعت × ریال)	درآمد کل سال سامانه (ریال)	
۶۵۰۹۵۲	$8000 \times 81/369$	بر روی سطح تخت
۷۶۸۹۹۲	$8000 \times 96/124$	بر روی سطح استوانه‌ای
۸۰۱۳۲۰	$8000 \times 100/165$	بر روی سطح نیم کره

مأخذ: یافه‌های تحقیق

#### شناسایی هزینه‌ها و منافع سامانه‌های منعطف خورشیدی

گام اول در راه‌اندازی سامانه تبدیل انرژی خورشیدی بر پایه پنل‌های خورشیدی منعطف، خرید اجزای سامانه است که در واقع هزینه ثابت سرمایه‌گذاری می‌باشد. طبق تحقیقات بعمل آمده، هزینه (قیمت تمام شده) پنل‌های فتوولتایک منعطف در مقیاس کوچک معادل ۰/۸ دلار به ازای هر وات می‌باشد. بنا براین، ۵۶ وات معادل ۱۵۶۸۰۰۰ ریال در سال ۱۳۹۵ می‌باشد. سرعت کاهش رشد قیمت محصولات فتوولتایک لایه نازک چشمگیر می‌باشد، لکن علاوه بر پنل، تجهیزات دیگری نیز در سامانه فتوولتایک منعطف به کار می‌رود. هزینه کل سامانه فتوولتایک منعطف شامل خرید پنل‌ها، هزینه نصب (بدون نیاز به سازه)، مالیات، باتری، اینورتر و ... بر اساس استاندارد در پروژه‌های فتوولتایک حاضر، ۵۴۵۳۳۵۰ ریال برآورد می‌گردد (Ardani et al., 2016).

هزینه‌های پیش‌بینی نشده شامل هزینه‌های چسب برای تماس مجدد پنل‌ها با سطوح و هزینه تعمیر و نگهداری و خاک زدایی برای یک سال معادل ۵۰۰۰۰ ریال در نظر گرفته شده است. بنابراین، کل هزینه تعمیر و نگهداری در طول عمر مفید سامانه خورشیدی معادل ۲۰ سال برابر با ده میلیون ریال می‌باشد.

## ۴. نتایج و بحث

### ۴-۱. نتایج تحلیل فنی

آرایه فتوولتاییک منعطف مشکل از ۱۶ پنل خورشیدی منعطف مدل JNPsolar3W-12V به صورت سری بر روی سطوح مختلف متصل شده‌اند. سطح این آرایه پس از اتصال سری و جدا از شبکه، معادل  $9444 \text{ cm}^2$  محاسبه شد. بنابراین، سطح فتوولتاییک  $5\text{K}$  مؤثر در روابط طراحی الکتریکی با حذف حاشیه غیر مؤثر برابر  $6996 \text{ cm}^2$  محاسبه می‌گردد. شکل (۲) تحلیل توان آرایه منعطف را در حالت استقرار بر روی سطوح مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۲. تحلیل توان آرایه منعطف در حالت استقرار بر روی سطح تخت، استوانه‌ای و کروی

با در ک مقدار واریانس و منع ایجاد واریانس، شرایط بهترین عملکرد در سامانه ها، به طور همزمان پیش بینی شد که این از مزیت های استفاده از این روش آزمایش برای سامانه می باشد. جدول (۳) متغیر های آزمایش و سطوح آزمون را برای ارزیابی سامانه منعطف خورشیدی نشان می دهد. در این آزمایش، ۴ متغیر انتخاب شد، متغیر توان تابشی در ۶ سطح و متغیر های دما، سرعت باد، میانگین قوس کمان سامانه در سه سطح موجود هستند. قوس کمان آرایه منعطف برای سطح (۱) معادل آزمون بر روی سامانه در حالت تخت بوده و سطح (۲) مربوط به آزمون سامانه در حالت استقرار بر روی سطح نیم کره و سطح (۳) قوس کمان مربوط به آزمون سامانه در حالت استقرار بر روی سطح استوانه ای می باشد. متغیر توان تابشی، از طلوع خورشید تا غروب خورشید از ۰ تا ۱۲۰۰ وات بر متر مربع دسته بندی شده که مجموعا در ۶ سطح مورد آزمون و تحلیل قرار گرفته است. متغیر دما در سه سطح از دمای محیطی ۲۰ تا ۵۰ درجه سلسیوس در آزمون مشارکت دارد. متغیر سرعت باد در سه سطح صفر تا ۳ متر بر ثانیه در آزمون مشارکت دارد.

در طرح آزمایش آرایه متعامد تاگوچی سامانه منعطف خورشیدی با چهار متغیر، نهایتا ۱۸ آزمایش انجام شد که جدول (۴) آرایه های متعامد آزمایش های تاگوچی برای طرح  $\{L_{18}(6 \times 3^3)\}$  را به همراه نتایج توان و عملکرد سامانه نشان می دهد.

جدول ۳. متغیرها و سطوح آزمایش های تاگوچی

متغیر سطح	توان تابشی ( $\frac{W}{m^2}$ )	دما (°C)	سرعت باد ( $\frac{m}{s}$ )	قوس کمان (°)	(۱)	(۲)	(۳)	(۴)
					(۵)	(۶)	(۷)	(۸)
۰-۲۰۰	۲۰-۳۰	۱-۰	۵-۰	-	۴۰۰-۲۰۰	۴۰۰-۲۰۰	۶۰۰-۴۰۰	۸۰۰-۶۰۰
۴۰۰-۲۰۰	۴۰-۳۰	۱-۲	۴۵-۵	-	۱۰۰۰-۸۰۰	۱۰۰۰-۸۰۰	۱۲۰۰-۱۰۰۰	-
۶۰۰-۴۰۰	۵۰-۴۰	۳-۲	۹۰-۴۵	-	-	-	-	-
۸۰۰-۶۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۰۰۰-۸۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۲۰۰-۱۰۰۰	-	-	-	-	-	-	-	-

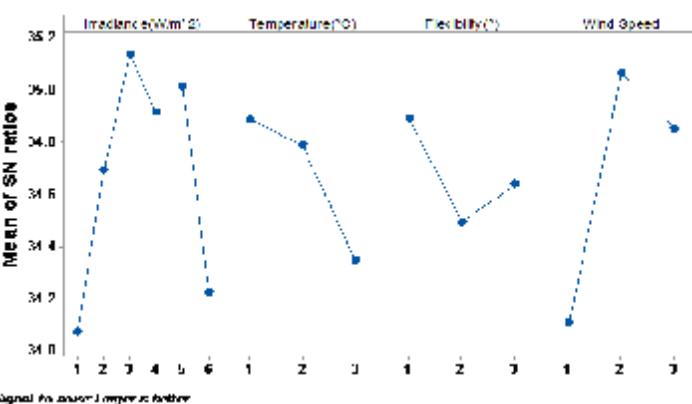
مأخذ: یافته های تحقیق

#### جدول ۴. آرایه‌های متعامد آزمایش‌های تاگوچی و پاسخ آنها

آزمایش متغیر	تابش ( $W/m^2$ )	دهمای (°C)	سرعت باد ( $m/s$ )	قوس (°)	توان (W)	رانتدمان (%)
۱	۱	۱	۱	۱	۴۷/۵	۵۸
۲	۱	۲	۲	۲	۵۲/۲	۷۴/۶
۳	۱	۳	۳	۳	۵۲	۷۴/۶
۴	۲	۱	۱	۲	۶۲/۵	۴۲/۵
۵	۲	۲	۲	۳	۵۳/۹	۲۵/۷
۶	۲	۳	۳	۱	۴۷/۴	۲۸
۷	۳	۱	۲	۱	۵۵	۱۶/۸
۸	۳	۲	۲	۳	۵۸/۴	۱۵/۶
۹	۳	۳	۱	۱	۵۸	۱۶/۳
۱۰	۴	۱	۳	۳	۵۶	۱۱/۸
۱۱	۴	۲	۱	۱	۵۵/۵	۱۸/۸
۱۲	۴	۳	۲	۲	۵۵/۵	۷/۴
۱۳	۵	۱	۲	۲	۵۷/۶	۹/۹
۱۴	۵	۲	۱	۳	۵۵	۹/۶
۱۵	۵	۳	۱	۱	۵۶/۳	۹/۵
۱۶	۶	۱	۲	۳	۵۵/۵	۷/۵
۱۷	۶	۲	۱	۱	۵۴/۴	۸/۶
۱۸	۶	۳	۲	۱	۵۴	۶/۱۳

مأخذ: یافته‌های تحقیق

چنانچه طرح آزمایش‌های تاگوچی را بر مبنای قابلیت تولید بیشترین توان در Minitab مورد تحلیل قرار گیرد، خروجی تحلیل آزمایش مطابق شکل (۳) خواهد بود که شرح آن آمده است.



شکل ۳. نتایج تحلیل میانگین اثرات آزمایش تاگوجی(نسبت سیگنال به نویز) بر روی سامانه‌ها

در شکل (۳) تمام متغیرهای تابش، دما، انعطاف پذیری (زاویه) و سرعت باد مشخص می‌باشد.

در محور طول‌ها نمودار سطوح متغیرها مشخص می‌باشد. محور عمودی میانگین <sup>1</sup> SNr را نشان می‌دهد. در این آزمون، توان بر اساس «بیشتر، بهتر» مورد ارزیابی قرار گرفته است. محور عمودی در حالت عمومی هرچه SNr بیشتر باشد، تزدیکی به هدف را نشان می‌دهد و فرقی بین انتخاب «بیشتر، بهتر» و «یا کمتر، بهتر» نخواهد بود.

در نمودار شکل (۳) چنانچه تابش در سطح (۱) باشد، به هدف نزدیک‌تر خواهیم بود، یعنی عمل توان بیشتری در اختیار قرار می‌گیرد. لازم به توضیح است که بررسی و تحلیل عملکرد (راندمان) سامانه فتوولتاییک نیز این موضوع را در مورد سلول‌های خورشیدی منعطف تصدیق می‌کند. تابش خصوصیت مشترکی بر روی سامانه‌ها تا سطح (۳) خواهد داشت، پس از آن، کمی تأثیرپذیری کاهش یافته، اما هنوز برای سامانه بهینه بوده و هدف را ارضا می‌کند. اما در توان تابشی بیش از سطح (۵) یعنی در سطح (۶) و بالاتر، سامانه در خلاف جهت هدف قرار می‌گیرد. با نگاه کلی به گروه توان

1.Signal to Noise ratio

تابشی و SNr آن، مشاهده می‌شود توان تابشی با فاصله‌گیری از خط میانی و شکستی زیاد می‌تواند بر هدف که ظرفیت تولید توان الکتریکی است، تأثیر بسیار داشته باشد. دمای محیطی در گروه دوم قرار گرفته و سطح (۳) دما، بیشترین تأثیر را بر هدف سامانه داشت. تغییرات در سرعت باد از سطح (۱) تا سطح (۲) در هدف سامانه بسیار مؤثر بود و توانست شرایط را به نوعی برای تولید توان در دماهای بالای محیطی تغییر دهد. انعطاف‌پذیری یا زاویه سامانه فتوولتاییک نشان داد تغییر این متغیر یعنی استفاده از سامانه در حالت تخت (سطح ۱) یا استفاده از سامانه در حالت استقرار روی سطح کروی (سطح ۲) و یا استفاده از سامانه در سطح استوانه‌ای (سطح ۳) می‌تواند بر روی هدف تولید توان بیشینه تأثیر داشته باشد. گروه زاویه سامانه‌ها و SNr نشان داد سطح (۱) یعنی استفاده از سامانه در سطح کاملاً تخت می‌تواند بیشترین تأثیر را بر روی سامانه داشته باشد. بکارگیری سامانه بر روی سطح (۲) یعنی استفاده از سامانه روی سطح کروی با اینکه هدف تولید توان را در نزدیکی میانگین خواهد داشت، اما نسبت به سطوح (۱) و (۳) بهینه می‌باشد. سطح (۳) یعنی بکارگیری سامانه بر روی استوانه نسبت به سطح تخت بهینه بوده، اما تولید توان در سطح (۲) بیشینه می‌باشد. بنابراین، استفاده از سامانه در حالت تخت بر روی پشت‌بام مانند ایزوگام دارای اولویت نیست. همچنین چنانچه در مزرعه‌ای همزمان دارای سیلوی انبار غله و مخزن بیوگازسوز باشیم، استفاده از سامانه در این شرایط بر استفاده در سطح نیم کره یعنی مخزن بیوگازسوز ترجیح خواهد داشت. با در نظر گرفتن تمام گروه‌ها، بیشترین تأثیرگذاری بر روی هدف سامانه یعنی بیشینه شدن توان سامانه خورشیدی به ترتیب مربوط به سطوح تابش، سرعت باد، دما و بکارگیری بر روی سطوح مختلف همچون سطح تخت، استوانه‌ای و کروی می‌باشد. جدول (۵) پاسخ سیگنال به نویز تاگوجی برای ارزیابی متغیرهای آزمون و تعیین اولویت هر کدام را نشان می‌دهد.

پیش‌گویی تحلیل تاگوچی در آزمایش حاضر نشان داد چنانچه سامانه در سطوح انتخابی بر اساس بهینه فرآیند تولید و متغیرهای مورد آزمون قرار گیرد، می‌توان از آن توان ترکیبی معادل با  $W = ۴۹/۹$  را با  $SNr = ۳۳/۹۲۹$  انتظار داشت. چنانچه آزمایش را برای استفاده سامانه به صورت مجزا و بر روی سطح کاملاً تخت محاسبه کنیم، توان سامانه معادل  $W = ۵۳/۳$  با  $SNr = ۳۴/۴۹۱۸$  خواهد بود. چنانچه سامانه برای استفاده بر روی سطح استوانه‌ای مورد پیش‌بینی توان قرار گیرد، توان سامانه معادل  $W = ۵۴/۰۵$  با  $SNr = ۳۴/۶۳۶۸$  می‌گردد. این میزان برای سطح نیم کره معادل توان  $W = ۵۴/۷$  با  $SNr = ۳۴/۸۸۸۰$  محاسبه شد.

**جدول ۵. نسبت سیگنال به نویز میانگین در آزمایش‌های تاگوچی**

سطح	توان تابشی	دما	انعطاف پذیری	سرعت باد	
۱	۳۴/۰۷	۳۴/۸۹	۳۴/۸۹	۳۴/۱۰	
۲	۳۴/۶۹	۳۴/۷۹	۳۴/۴۹	۳۵/۰۶	
۳	۳۵/۱۳	۳۴/۳۴	۳۴/۶۴	۳۴/۸۵	
۴	۳۴/۹۱	-	-	-	
۵	۳۵/۰۱	-	-	-	
۶	۳۴/۲۲	-	-	-	
اختلاف	۱/۰۷	۰/۵۴	۰/۴۰	۰/۹۶	
اهمیت	۱	۳	۴	۲	

مانند: یافته‌های تحقیق

## ۲-۴ نتایج تحلیل اقتصادی

نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی در نرم‌افزار کامفار نشان می‌دهد خالص ارزش فعلی سامانه منعطف در حالت استقرار بر روی سطح تخت به میزان ۶/۷۴۷ میلیون ریال و نرخ بازده داخلی آن ۲۳/۸۲ درصد و دوره بازگشت سرمایه نیز ۹/۲۴ سال می‌باشد. همچین خالص ارزش فعلی سامانه منعطف در حالت استقرار بر روی سطوح استوانه‌ای و نیم کره به ترتیب معادل ۹/۹۵۲ ریال و ۱۰/۸۳۰ ریال و نرخ بازده داخلی آنها ۲۶/۷۰ درصد و دوره بازگشت سرمایه به ترتیب برابر ۸/۰۲ سال و ۸/۰۲ سال می‌باشد.

### تحلیل خالص ارزش فعلی (NPV)

متغیر ارزش فعلی یکی از مهم‌ترین روش‌های اقتصاد مهندسی است. برآورد ارزش فعلی یک فرآیند مالی، تبدیل ارزش آینده کلیه دریافت‌ها و پرداخت‌ها به ارزش حال حاضر در زمان فعلی یا مبدأ پروژه می‌باشد. چنانچه ارزش فعلی خالص به ازای حداقل نرخ جذب کننده برای یک پروژه کوچکتر از صفر باشد، آن پروژه غیراقتصادی خواهد بود و مشخص کننده آن است که ارزش فعلی هزینه‌ها کمتر از ارزش فعلی درآمدها می‌باشد و چنانچه ارزش فعلی خالص مثبت گردد، ارزش فعلی هزینه‌ها کمتر از ارزش فعلی درآمد بوده و پروژه اقتصادی است. چنانچه ارزش فعلی خالص برابر صفر گردد، پروژه اقتصادی است، زیرا حداقل نرخ جذب کننده برای سرمایه‌گذار تأمین شده است. نمودار شکل (۴) NPV طرح‌ها را به ازای نرخ تنزیل مختلف در سه سطح برازش سامانه‌های منعطف خورشیدی بر روی سطوح تخت، استوانه‌ای و نیم کره نشان می‌دهد. نکات قابل توجه در نمودارها عبارتند از:

- ۱) با افزایش نرخ تنزیل، NPV برای هر سه سامانه کاهش می‌یابد.
- ۲) سامانه در حالت استقرار بر روی سطح تخت در نرخ تنزیل ۲۳ درصد پروژه، ارزش فعلی هزینه‌ها و درآمد طرح برابر شده است.

<sup>۳</sup>(سامانه در حالت استقرار بر روی سطح استوانه‌ای در نرخ تنزیل ۲۶ درصد پروژه، ارزش فعلی هزینه‌ها و درآمد طرح برابر شده است.

<sup>۴</sup>(سامانه در حالت استقرار بر روی سطح نیم کره در نرخ تنزیل ۲۷ درصد پروژه، ارزش فعلی هزینه‌ها و درآمد طرح برابر شده است.

با افزایش نرخ تنزیل از ۲۳ درصد به بالا در سطح تخت، ۲۶ درصد به بالا در سطح استوانه‌ای و ۲۷ درصد به بالا در سطح نیم کره، ارزش فعلی هزینه‌ها بیشتر از ارزش فعلی درآمدها می‌باشد و به عبارت دیگر، پروژه غیراقتصادی می‌شود.

#### تحلیل نرخ بازده داخلی (IRR)

در هنگام استفاده از این روش، ضابطه قبول یا رد یک پروژه، معیاری (فرضی) است که درآمدها

(درآمدهای سالانه) و هزینه‌ها (سرمایه اولیه و هزینه‌های سالانه) را به تعادل می‌رساند. این نرخ که

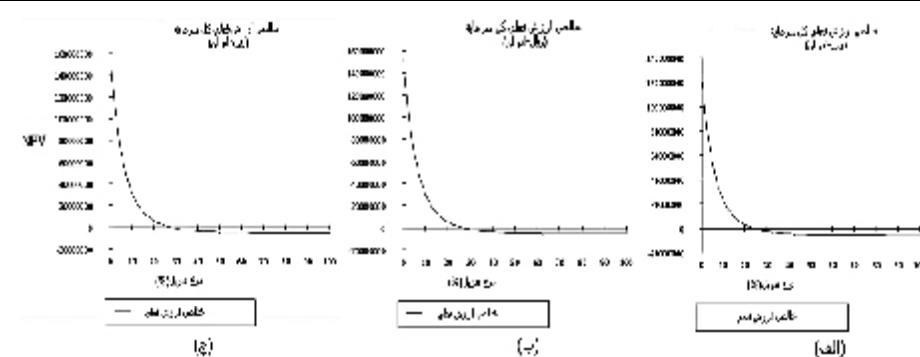
به ازای آن درآمدها و هزینه‌های پروژه به تعادل می‌رسد، «نرخ بازده داخلی» نامیده می‌شود.

شاخص‌های تنزیلی پروژه در حالت اصلی با حداقل نرخ جذب کننده ۱۶/۷ درصد به شرح جدول

(۶) می‌باشد.

جدول ۶. شاخص‌های تنزیلی در سامانه‌ها (میلیون ریال)		
نرخ بازده داخلی با تورم	طرح فتوولتایک با تورم	خالص ارزش فعلی نرخ بازده داخلی
۶/۷۴۷	۲۳/۸۲	استقرار بر روی سطح تخت
۹/۹۵۲	۲۶/۷۰	استقرار بر روی سطح استوانه‌ای
۱۰/۸۳۰	۲۷/۴۶	استقرار بر روی سطح نیم کره

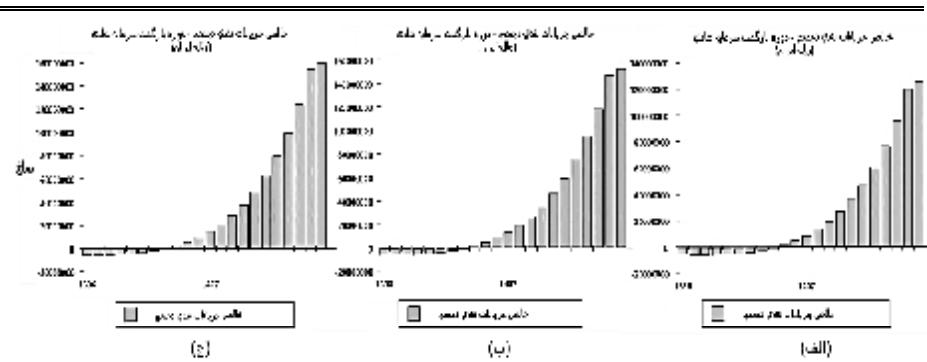
مأخذ: یافته‌های تحقیق



شکل ۴. نتایج خالص ارزش فعلى کل سرمایه در سه سامانه (الف: استقرار بر روی سطح تخت ب: استقرار بر روی سطح استوانه‌ای ج: استقرار بر روی سطح نیم کره)

#### تحلیل نمودار دوره بازگشت سرمایه عادی (PP)

شکل (۵) خالص جریانات نقدی تجمعی-دوره بازگشت سرمایه عادی را برای سامانه‌ها در سه حالت استقرار نمایش می‌دهد. دوران ساخت و راهاندازی سامانه‌های منعطف خورشیدی خالص جریانات منفی بوده و در سامانه در حالت استقرار بر روی سطح تخت، استوانه‌ای و نیم کره به ترتیب از سال ۹/۲۴، سال ۸/۲۴ و سال ۰۲/۸ تا پایان دوران بهره‌برداری، خالص جریانات تجمعی طرحها مثبت و به طور یکنواخت در حال افزایش می‌باشد. همچنین PP عادی سرمایه در سامانه در حالت استقرار بر روی سطح تخت، ۹ سال و در حالت استقرار بر روی سطوح استوانه و نیم کره، ۸ سال می‌باشد (PP عادی سرمایه در سامانه مستقر بر روی سطح نیم کره معادل ۷/۰۷ می‌باشد، بنابراین می‌توان سال آن را ۷ در نظر گرفت)، یعنی به ترتیب برای سامانه تخت، در سال ۱۴۰۵ و برای سامانه‌های استوانه‌ای و نیم کره در سال ۱۴۰۴ سرمایه اولیه پرداخت شده مجدداً تحصیل خواهد شد.



شکل ۵. نتایج محاسبه PP عادی سرمایه - گردش وجوه نقد تجمعی در سه سامانه (الف: استقرار بر روی سطح تخت ب: استقرار بر روی سطح استوانه‌ای ج: استقرار بر روی سطح نیم کره)

۵. نتیجہ گیری

با توجه به اینکه بررسی توجیه پذیری طرحها معمولاً در حالت عدم اطمینان انجام می‌شود، تحلیل حساسیت معیار مهمی در بررسی ریسک سرمایه‌گذاری به حساب می‌آید. در واقع، در تحلیل حساسیت، با تکرار محاسبات مالی از طریق تغییر متغیرهای اثرگذار بر نتایج ارزیابی، نتایج بدست آمده با نتایج اولیه مورد مقایسه قرار می‌گیرد. اگر تغییرات ایجاد شده در متغیرها طرح را از توجیه پذیری خارج نکند، سرمایه‌گذاری با اطمینان بیشتری انجام خواهد شد.

به منظور لحاظ کردن عوامل در نظر گرفته نشده و یا ریسک عواملی که بازده پژوهه را با خطر مواجه می‌کنند، میزان حساسیت شاخص‌های پژوهه نسبت به این عوامل به طور تقریبی برآورد می‌شود. بدین منظور، حساسیت شاخص‌های پژوهه نسبت به تغییرات در آمدها و هزینه‌ها در جدول (۷) ارائه شده است.

## جدول ۷. محاسبات حساسیت NPV و IRR نسبت به تغییرات درآمدها و هزینه‌های پروژه

تغییرات سرمایه گذاری ثابت(درصد)	سطح نیم کره	سطح استوانه‌ای	سطح تخت	تغییرات سرمایه نابت(درصد)	سطح نیم کره	سطح استوانه‌ای	سطح تخت
-۲۰	-۱۰	۱۰	۲۰	-۲۰	-۱۰	۱۰	۲۰
ادرزش فعلی پروژه(میلیون ریال)	۱۱/۰۸۸ ۵/۷۶۸	۶/۲۲۶ ۵/۰۸۱	۱۰/۲۱۰ ۸/۹۷۳	۸/۲۸۶ ۷/۰۰۵	۹/۴۳۱ ۵/۷۶۸	۱۰/۳۰۹ ۹/۸۵۱	۱۰/۲۱۰ ۸/۹۷۳
نرخ بازدهی داخلی(درصد)	۲۸/۰۳ ۲۲/۲۴	۲۷/۲۶ ۲۴/۸۹	۲۴/۴۸ ۲۵/۶۹	۲۳/۸۳ ۲۵/۴۱	۲۴/۳۰ ۲۲/۹۴	۲۱/۳۰ ۲۰/۴۱	۲۱/۳۰ ۲۰/۴۱
تغییرات درآمد نابت(درصد)	-۲۰	-۱۰	۱۰	۲۰	-۲۰	-۱۰	۱۰
ادرزش فعلی پروژه(میلیون ریال)	۹/۷۵۰ ۵/۵۱۴	۱۲/۴۰۲ ۱۰/۰۶۹	۱۲/۰۴۰ ۱۰/۰۶۹	۱۳/۸۷۷ ۸/۹۱۶	۱۳/۸۷۷ ۸/۹۱۶	۱۴/۹۲۰ ۱۳/۰۰۵	۱۷/۷۹۲ ۱۶/۶۳۳
نرخ بازدهی داخلی(درصد)	۲۶/۵۳ ۳۰/۰۱	۲۸/۷۹ ۲۷/۴۹	۳۲/۲۳ ۲۶/۸۱	۲۲/۹۹ ۲۵/۴۳	۳۳/۱۴ ۲۵/۷۹	۳۰/۸۶ ۲۸/۷۹	۳۰/۰۱ ۲۸/۷۹
مأخذ: یافته‌های تحقیق							

به این ترتیب، در سامانه در حالت استقرار بر روی سطح تخت ۲۰ درصد افزایش در هزینه‌های پروژه، نرخ بازده داخلی ۲۱/۳۰ درصد افزایش داده و ۲۰ درصد کاهش در میزان درآمدها، منجر به کاهش نرخ بازده داخلی پروژه به ۲۲/۹۹ درصد می‌گردد. همچنین در سامانه خورشیدی منعطف در حالت استقرار بر روی سطح استوانه‌ای و نیم کره با افزایش ۲۰ درصدی هزینه‌های پروژه، به ترتیب نرخ بازده داخلی به ۲۵/۶۹ درصد و ۲۴/۴۸ درصد و با کاهش ۲۰ درصدی درآمدها، کاهش نرخ بازدهی داخلی پروژه به ترتیب برابر ۲۵/۷۹ درصد و ۲۶/۵۳ درصد خواهد بود.

بنابراین، ترتیب اقتصادی بودن در سامانه‌ها نیز به ترتیب مربوط به سامانه خورشیدی منعطف در حالت استقرار بر روی سطح نیم کره، استوانه‌ای و تخت خواهد بود.

جدول (۸) خلاصه نتایج آزمون تحلیل فنی - اقتصادی سامانه‌ها را نشان می‌دهد.

**جدول ۸. خلاصه ارزیابی رفتار سامانه‌ها برای مشخصه  
توان «هرچه بیشتر، بهتر»**

سامانه	متغیر پوشش	توان بیشینه (W)	عملکرد (%)	ولتاژ مدار باز (V)	جریان اتصال کوتاه (A)	بازدهی داخلی	خلاص ارزش فعلی
تحت	۰/۷۳	۴۶/۷۱	۷/۰۹	۱۸۵/۶۹۶	۰/۳۴۶۵	۲۳/۸۲	۶/۷۴۷
استوانه‌ای	۰/۸۸	۵۵/۱۸	۷/۴۵	۱۷۹/۰۴	۰/۳۵	۲۶/۷۰	۹/۹۵۲
کروی	۰/۸۴	۵۷/۵۰	۷/۴۵	۱۷۸/۴۹۶	۰/۳۶	۲۷/۴۶	۱۰/۸۳۰

مأخذ: یافته‌های تحقیق

کمینه متغیر پوشش مربوط به سطح تخت بوده و سامانه در حالت استقرار بر روی سطوح استوانه و نیم کره دارای متغیر پوشش به ترتیب ۰/۸۸ و ۰/۸۴ می‌باشد. متغیر پوشش بیشتر برای سامانه‌ها به کنترل کننده توان امکان برداشت توزیع بیشتری از ولتاژ و توان را خواهد داد. توان بیشینه مربوط به استقرار سامانه بر روی سطح نیم کره بوده و معادل ۵۷/۵۰ وات بوده است در حالی که کمینه توان معادل ۴۶/۷۱ وات مربوط به سامانه در حالت استقرار بر روی سطح تخت می‌باشد. عملکرد سامانه‌ها در شرایط استاندارد (دما ۲۵ درجه سلسیوس و توان تابشی ۱۰۰۰ وات بر مترمربع) برای حالت استقرار بر روی سطوح استوانه و نیم کره برابر و معادل ۷/۴۵ درصد محاسبه شده است. کمینه عملکرد معادل ۷/۰۹ درصد و مربوط به سطح تخت محاسبه شد. ولتاژ جریان باز و جریان مدار بسته در حالت بیشینه مربوط به استقرار سامانه منعطف بر روی سطح تخت بوده و به ترتیب معادل ۱۸۵/۶۹۶ ولت و ۰/۳۴۶۵ آمپر اندازه گیری شد. همچنین بیشینه جریان تولیدی در حالت استقرار سامانه بر روی سطح نیم کره معادل ۰/۳۶ آمپر به دست آمد. بنابراین، سامانه در حالت استقرار بر روی سطح نیم کره با دریافت تابش‌های پخشی علاوه بر تابش عمودی دارای مشخصه‌های الکتریکی و کیفیت بهینه نسبت به سطوح استقرار دیگر می‌باشد. اولویت‌های دوم و سوم به ترتیب مربوط به استوانه و تخت می‌باشد.

نتایج تحلیل اقتصادی سامانه‌ها نشان می‌دهد نرخ بازده داخلی در سامانه منعطف خورشیدی در حالت استقرار بر روی سطح تخت، استوانه‌ای و نیم کره به ترتیب  $22/82$  و  $26/70$  و  $27/46$  درصد می‌باشد و خالص ارزش فعلی برابر با  $6/747$  میلیون ریال و  $9/952$  میلیون ریال و  $10/830$  میلیون ریال است که با توجه به مثبت بودن ارزش خالص فعلی و نرخ مناسب بازدهی اقتصادی، طرح‌ها ضمن داشتن توجیه اقتصادی جهت جذب سرمایه، اولویت استفاده از سامانه‌های منعطف بر روی سطوح به ترتیب نیم کره، استوانه‌ای و تخت طبقه‌بندی می‌گردند.

### تقدیر و تشکر

نویسنده‌گان مقاله بدینوسیله از اساتید گروه اقتصاد و برق دانشگاه تربیت مدرس که در پیشبرد اهداف پژوهشی تحقیق کمک و یاری داشتند، کمال تشکر را دارند.

## منابع

- اسحاقی، ا.ف. مجیری و ا. کرمی (۱۳۹۴)، "ازیابی لایه نازک کربن شبه الماسی اعمال شده به روش رسوب شیمیابی بخار تقویت شده با پلاسما بر عملکرد سلول خورشیدی سیلیکونی"، مجله مواد نوین، شماره ۴، جلد ۵، صص ۱۶۴-۱۶۵.
- اسکونزاد، م (۱۳۸۳)، اقتصاد مهندسی، تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ اول.
- رییعی، م (۱۳۹۱)، "تمامین سه درصد از کل انرژی کشور با منابع تجدید پذیر"، ماهنامه بین‌المللی آموزشی، پژوهشی تحلیل و اطلاع رسانی پیام سبز، شماره ۱۰۶، آبان ۱۳۹۱.
- رنوفی راد، م (۱۳۸۵)، طراحی سیستم‌های خورشیدی ساختمان در ایران، انتشارات شرکت ملی نفت، چاپ اول.
- زمانی آقایی، ع؛ برادران رحیمی، ا. و ع. اکبرزاده (۱۳۹۴)، "بهینه‌سازی هندسه آشوبگرهای دندانه‌ای زاویه‌دار به منظور بهبود رفتار ترمومهیدرولیکی جریان به کمک روش تاگوچی"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۵، شماره ۴، صص ۲۹-۲۳.
- سایت بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران، (۱۳۹۶)، بررسی تحولات تورم طی سال‌های ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۵.
- سایت سازمان بهروردی انرژی ایران(سبا) (۱۳۹۵)، روند مصرف انرژی در ایران.
- سایت سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهروردی انرژی برق(ساتبا) (۱۳۹۶)، تعرفه خرید تضمینی برق از نیروگاههای تجدیدپذیر و پاک.
- شفیعی، م؛ ر. فیاض و ش. حیدری (۱۳۹۲)، "فرم مناسب ساختمان بلند برای دریافت انرژی تابشی در تهران"، نشریه انرژی ایران، شماره ۴. جلد ۱۶، صص ۶۰-۴۷.
- صالحی قلعه سفید، س؛ دهقانی، م؛ توکلی، ع. و م. ارفاق (۱۳۹۰). "مطالعه تأثیر شرایط محیطی بر روی بازده سلول‌های خورشیدی در استان خوزستان و ارائه راهکارهایی برای بهبود عملکرد آنها"، گزارش کمیته مرکزی تحقیقات، پژوهه تحقیقاتی شرکت برق منطقه‌ای خوزستان، ۱۳۹۱-۱۳۹۰، صص ۳۸-۲۳.
- هور، م؛ ریاحی نوری، ن؛ و پ. امامقلیزاده سیار (۱۳۹۱)، "به کارگیری روش طراحی آزمون تاگوچی در سنتر نانو پودر دی‌اکسید تیتانیم به روش سل - ژل مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی"، بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق-تهران، صص ۱-۸.
- محمودی، م؛ صادقی، م. و ف. فرهادپور (۱۳۹۰)، "شناسایی رژیم‌های جریان دوفازی و محاسبه افت فشار در چاههای تحت فرازآوری با گاز"، نشریه پژوهش نفت، شماره ۶۸، صص ۷۰-۵۷.

مهدوی عادلی، م؛ سلیمانی فروغی، م. و ا. قزلباش (۱۳۹۳)، "ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی برق خورشیدی (فتولتاییک) و برق فسیلی در مصارف خانگی (مطالعه موردی مجتمع سه واحدی در شهرستان مشهد)"، مجله علمی - پژوهشی سیاستگذاری اقتصادی، سال ششم، شماره ۱۱، صص ۱۴۷-۱۲۳.

جوادی، م؛ جلیل وند، ا؛ نوروزیان، ر. و م. ولی زاده (۱۳۸۹)، "طراحی بهینه و مدیریت هوشمند انرژی سیستم هیبرید مسقلم از شبکه برای مناطق روستایی"، نشریه انرژی ایران، جلد ۱۳، شماره ۴، صص ۵۸-۴۰.

وزارت نیرو، (۱۳۹۰)، "انرژی خورشیدی"، معاونت امور انرژی، سازمان انرژی‌های نو ایران.

**Ardani, K; O'Shaughnessy, E; Fu, R; McClurg, C; Huneycutt, J. and R. Margolis** (2017), "Installed Cost Benchmarks And Deployment Barriers for Residential Solar Photovoltaics with Energy Storage: Q1 2016. National Renewable Energy Laboratory(NREL)", Available On The: <http://www.nrel.gov/publications>.

**Bloem, J; Lodi, C; Cipriano, J. and D. Chemisa** (2012), "An Outdoor Test Reference Environment for Double Skin Applications of Building Integrated Systems", Journal of Energy And Buildings, Elsevier. Vol. 50.pp. 63-73.

**Ekrami, A; Sadeghi, M. and B. Mahdavi** (2008), "Economic Evaluation of The Development of Solar Power Plants due to Environmental Considerations", Journal of Environmental Science And Technology, Vol. No. 2. pp. 44-51.

**Gmo.** (2014), "Global Market Outlook 2014 Solarpowereurope".

**Gra, M. and K. Kevin** (2014), "Environmental Effects on The Operation of Triple-Junction Flexible Photovoltaic Panel", A Thesis Submitted to The Faculty of Graduate And Post Doctoral Affairs in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master Ece Electrical And Computer Engineering, Carleton University, Ottawa, Carleton Institute.

**Gregg, A; Blieden, R; Chang, A. and H. Ng** (2005), "Performance Analysis of Large Scale, Amorphous Silicon, Photovoltaic Power Systems", Photovoltaic Specialists Conference, 2005, Conference Record of The Thirty-First IEEE, Auburn Hills. PP. 1615-1618.

**Hadjaissa, A; Ait, C; Ameur, K. and N. Essounbouli** (2016), "A Ga-Based Optimization of A Fuzzy-Based Mppt Controller for A Photovoltaic Pumping System(Case Study for Laghouat,Algeria)", International Federation of Automatic Control(Ifac)", Elsevier Ltd, Vol. 1. pp. 692-697.

**Harendra, S; Prashant, K; Tayal, S. and S. Verma** (2013), "The Third Generation Dye-Sensitized Solar Cell", International Journal of Advanced Technology in Engineering And Science(Ijates). pp. 415-421.

**Iea.** (2015), "Snapshot of Global Pv 1992-2014", Available on The : <Http://Www.Iea-Pvps.Org/Index.Php?Id=32>.

- Iea.** (2014), "Technology Roadmap(Solar Photovoltaic Energy)", Paris, International Energy Agency.
- Jnp.** (2016), "Tianjin-Jinneng(Globalsources. - Tianjin Jinneng Solar Cell Co. Ltd)", Available on The: <Http://Www.Globalsources.Com/Si/As/Tianjin-Jinneng/6008815379287/Pdtl/Solar-Modules/1004041898.Htm>.
- Kohjiro, H. and A. Hironori** (2005) , "Handbook of Photovoltaic Science And Engineering", John Wiley & Sons.
- Koukouvaos, C; Kandris, D. and M. Samarakou** (2014), "Computer-Aided Modelling And Analysis of PV Systems: A Comparative Study", The Scientific World Journal, Vol1.PP 17-29.
- Makrides, G.** (2012), Performance of Photovoltaics Under Actual Operating Conditions, Third Generation Photovoltaics, Intechopen Inc,Vol. 1.
- Medora, N. and A. Kusko** (2006), "An Enhanced Dynamic Battery Model of Lead-Acid Batteries Using Manufacturers' Data", Conference of Telecommunications Energy, Providence, IEEE Ltd. pp. 1-8.
- Miles, B; Jill, R; Lunt, J; Xu, A; Wang, C; Boyce, S; Vladimir, B. and G. Karen** (2011) , "Direct Monolithic Integration of Organic Photovoltaic Circuits on Unmodified Paper", Journal of Advanced Materials,vol.10, pp. 3500–3505.
- Murat , S.** (2008), "To Design And To Construct A Simple Ship Only Powered by Solar Energy", International Council for Coaching Excellence (Icce). Report: Middle East Technical University, Istanbul.
- Schlenker, C. and M. Thompson** (2012), Current Challenges in Organic Photovoltaic Solar Energy Conversion, Unimolecular And Supramolecular Electronics, Springer Berlin Heidelberg, Inc.
- Solangi, K; Islam, M; Saidur, R; Rahim, N. and H. Fayaz** (2011), "A Review on Global Solar Energy Policy", Journal of Renewable And Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, PP. 2149-2163.
- Zohoori, M.** (2012) , "Exploiting Renewable Energy Sources in Iran", Journal of Interdisciplinary Journal of Contemporary Research in Business,Vol. 4. PP. 849-862.

