

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

تحلیل کیفیت سامانه فتوولتاییک منعطف در سطوح منحنی

مصطفی اسماعیلی شایان

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم- انرژی‌های تجدیدپذیر،

دانشگاه تربیت مدرس

mostafa.esmaeili@modares.ac.ir

غلامحسین نجفی

دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس

(نویسنده مسئول)

g.najafi@modares.ac.ir

احمد بناکار

دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس

ah_banakar@modares.ac.ir

در این تحقیق، سامانه فتوولتاییک بر پایه پنل‌های خورشیدی منعطف در مقیاس ۱ متر مربع معادل ۵۶ وات طراحی، ساخت و مورد ارزیابی قرار گرفت. سامانه‌های متداول فتوولتاییک امکان استفاده در سطوح منحنی را محدود می‌کنند. با توجه به اهمیت متغیرهای محیطی، سامانه سنجش دما برای دریافت برخط داده‌ها و ارتباط با نرم‌افزار لب‌ویو طراحی و ساخته شد و داده‌های ایستگاه هواشناسی به دست آمد. تحلیل اقتصادی سامانه‌ها با استفاده از نرم‌افزار کامفار انجام گرفت. همچنین طرح آزمایشی تاگوچی با مشخصه هدف «هرچه توان بزرگتر، بهتر» برای انتخاب سامانه برتر استفاده شد. نتایج نشان داد انعطاف‌پذیری سامانه فتوولتاییک 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 ۵۳/۳۰ W و سطح استوانه معادل ۵۴/۰۵ W و سطح نیم کره معادل ۵۵/۷۰ W می‌باشد. تحلیل اقتصادی سامانه‌ها نشان داد نرخ بازده داخلی در حالت استقرار بر روی سطح تخت، استوانه‌ای و نیم کره به ترتیب ۲۳/۸۲ و ۲۶/۷۰ و ۲۷/۴۶ درصد و خالص ارزش فعلی برابر با ۶/۷۴۷ و ۹/۹۵۲ و ۱۰/۸۳۰ 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: فتوولتاییک، پنل‌های خورشیدی منعطف، لب‌ویو، تاگوچی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۴

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 تراوات‌ساعت می‌باشد، از طریق سلول‌های خورشیدی تأمین می‌شود (IEA, 2015; EPIA, 2015).

اهمیت انرژی و منابع مختلف تهیه آن، در حال حاضر در زمره رویکردهای اصلی دولت‌های جهان قرار گرفته است. سوخت‌های فسیلی بخش عمده تأمین نیاز انرژی را به خود اختصاص داده‌اند (Kohjiro, et al., 2005). بزرگ‌ترین چشمه 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^۱ در ایران از سال ۱۳۵۳ تا ۱۳۷۳ از ۱۰۰ به ۳۰۰ رسیده است. میانگین شدت انرژی در جهان ۰/۴ و این رقم در ایران بیش از ۰/۶ می‌باشد (بی‌نام، ۱۳۹۵).

انرژی خورشیدی به‌عنوان 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 کم‌فشار 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 فتوولتائیک 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)، به‌گونه‌ای که در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ سرانه تولید انرژی جهانی افزایش یافته است (Zohoori, 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 CO₂ دوستدار محیط‌زیست بوده و موجب حفظ منابع طبیعی، احیای اراضی، کاهش خطوط انتقال نیرو، افزایش استقلال منطقه‌ای در تأمین انرژی، افزایش سرعت برق‌رسانی 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 ساعات 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، بیرجند، 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 انحنای 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 فتوولتائیک در جهان

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

برقرسانی روستایی با استفاده از فتوولتاییک در سال ۱۳۸۵ ابتدا از استان قزوین آغاز و سپس در استان‌های گیلان، زنجان، بوشهر، یزد و کردستان اجرا شد. در همین راستا، پروژه برقرسانی فتوولتاییک به ۶۳۴ خانوار روستایی 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 فتوولتاییک 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 تاگوچی در سامانه گرمکن خورشیدی با آرایه متعامد L_{16} (4⁴) استفاده کردند. این روش علاوه بر تشریح رفتار ترموهیدرولیکی 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 مقرون‌بصرفه گزارش کردند (Gregg, et al., 2005). در پژوهشی با استفاده از نرم‌افزار کامفار ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی خورشیدی (فتوولتاییک) و برق فسیلی مصارف خانگی در ایران مورد بررسی قرار گرفت، نتایج آن توجیه‌پذیری بکارگیری سامانه فتوولتاییک در مجتمع‌های مسکونی را با بازگشت سرمایه ۱۳ ساله نشان داد (مهدوی عادل و همکاران، ۱۳۹۳).

شلنکر و تامسون در سال ۲۰۱۲ برای اولین بار پس از بکارگیری سلول‌های آلی خورشیدی، پردازشگر OPV^۱ 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^۲ و مدارات الکتریکی تأثیرگذار است (Medora and Kusko, 2006). کوکواس و همکاران بر روی انواع مبدل‌های آنالوگ و ارتباطدهی با نرم‌افزارهای مختلف در نرم‌افزارهای MATLAB^۳ و LabVIEW^۴ به منظور شبیه‌سازی و طراحی سامانه خورشیدی کار کردند. دقت اندازه‌گیری تحت حالت‌های مختلف در زمان واحد قابل داده‌کاوی 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

۲.باتری‌هایی که دارای الکترولیت 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 فتولتاییک به‌عنوان بدنه اشکال و اجسام، در هیچ پژوهشی سامانه‌های فتولتاییک 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 به‌طور کامل شناخته شده نیستند. استفاده از دیتالاکر 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 مقرون‌بصرفه 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 فتولتاییک a-Si به‌عنوان مبدل تابش خورشیدی به الکتروسیته 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، ولت‌سنج، توان‌سنج، مدارهای آماده‌ساز، مدار و فیوزهای باتری، مبدل آنالوگ به دیجیتال و رایانه می‌باشد.



شکل ۱. طرح‌واره سامانه فتوولتاییک منعطف و تجهیزات کنترلی

در این تحقیق، ماژول فتوولتاییک منعطف JNPsolar3W-12v با مشخصات جدول (۱) مورد استفاده قرار گرفت. المان فتوولتاییک آمورف سیلیکون خورشیدی فیلم نازک JNsolar3W-12v با سه محل اتصال رسوب در بستر پلیمر ضدزنگ و دیود قفل برای جلوگیری از تخلیه جریان باتری به سمت پنل خورشیدی در ماژول 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 9444 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 فتوولتاییک 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 فتوولتاییک برابر است با:

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

در رابطه (۲)، S_t معادل سطح فتوولتاییک پنل و S_C معادل سطح حاشیه‌ای یک پنل آزمون می‌باشد. بنابراین، سطح فتوولتاییک S_t مؤثر در روابط طراحی الکتریکی معادل 6996 cm^2 و سطح مؤثر در روابط طراحی هندسی سازه‌ها (S_T) معادل 9444 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 میلی‌ولت 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.

$$Temp_x = \text{read_adc}(0) \times 0.5 \quad (۳)$$

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

در اتصال ماژول 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 به‌عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر در تولید توان سامانه فتوولتاییک منعطف باید به‌صورت دقیق مورد توجه قرار گیرد. میکروکنترلر، هر ۵۰ میلی‌ثانیه 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^۱ 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 سه‌گانه می‌باشد که بر روی لایه نازک پلیمر چسبانده شده‌اند. متغیر پوشش (FF) مطابق رابطه (۴) بر روی سطوح محاسبه گردید (اسحاقی و همکاران، ۱۳۹۴).

$$FF = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (۴)$$

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

1.Fill Factor(FF)

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

در رابطه فوق، I برابر مجموعه تابش بر روی سطح آرایه با واحد W/m^2 و S_t برابر سطح آرایه فتوولتائیک با واحد m^2 و P 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 گردوخاک، 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^۱ سامانه منعطف خورشیدی با چهار متغیر، نهایتاً با ۱۸ آزمایش انجام شد. آرایه‌های متعامد آزمایش‌های تاگوچی برای طرح $\{L_{18}(6^1 \times 3^3)\}$ 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 $35/70^\circ$ عرض جغرافیایی و $51/25^\circ$ 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.

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 (اسکونزاد، 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^۱ (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، استاندارد است که مدیریت طرح برای سرمایه‌گذاری و بکارگیری وجوه، از قبل تعیین نموده است. به این بهره، «حداقل بهره قابل جذب» یا «هزینه سرمایه» می‌گویند.

ارزش فعلی مجموعه‌ای از جریان‌های نقد آینه 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 وجوه نقد، t برابر نرخ تنزیل و t برابر دوره مالی می‌باشد. 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 تنزیل مشخص به عنوان حداقل نرخ جذب کننده سرمایه گذار، شاخص خالص ارزش فعلی برای یک پروژه با اعمال تورم، رقمی مثبت باشد، این امر نشان دهنده توجیه پذیر بودن پروژه است و همچنین اختلاف زیاد بین جریانهای نقدی خروجی و ورودی پروژه و بزرگ بودن این شاخص، جذابیت سرمایه گذاری در پروژه را بیشتر می‌کند.

نسبت منفعت - هزینه

نسبت منفعت - هزینه در واقع نسبت مجموع ارزش فعلی درآمدهای حاصل از اجرای پروژه را به مجموع ارزش فعلی هزینه‌های حاصل از آن نشان می‌دهد که بیان دیگری از ارزش فعلی خالص پروژه‌ها می‌باشد.

معیار نرخ بازده داخلی (IRR)

¹ IRR معیار مشهوری در ارزیابی اقتصادی پروژه‌هاست و شرط پذیرش پروژه را بزرگتر بودن IRR از هزینه سرمایه² می‌داند. IRR نرخ تنزیلی است که بر اساس آن، ارزش خالص فعلی پروژه (NPV) برابر صفر می‌شود. اگر NPV پروژه‌ای مثبت باشد، IRR آن پروژه از نرخ بازدهی که برای سرمایه گذاری به کار برده شده، بیشتر است. در محاسبه NPV فرض بر این است که نرخ تنزیل مشخص است و NPV پروژه تعیین می‌گردد. 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^۱ (PP)، دوره‌ای که در آن مجموع درآمدهای سالانه با هزینه سرمایه‌گذاری برابر (سربه‌سر) 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 جذابیت 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 به‌طور 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 به‌عنوان 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 مبین 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 مصرف‌کننده 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 پیشینه 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)
بر روی سطح تخت	۸۱/۳۶۹ × ۸۰۰۰	۶۵۰۹۵۲
بر روی سطح استوانه‌ای	۹۶/۱۲۴ × ۸۰۰۰	۷۶۸۹۹۲
بر روی سطح نیم کره	۱۰۰/۱۶۵ × ۸۰۰۰	۸۰۱۳۲۰

مأخذ: یافته‌های تحقیق

شناسایی هزینه‌ها و منافع سامانه‌های منعطف خورشیدی

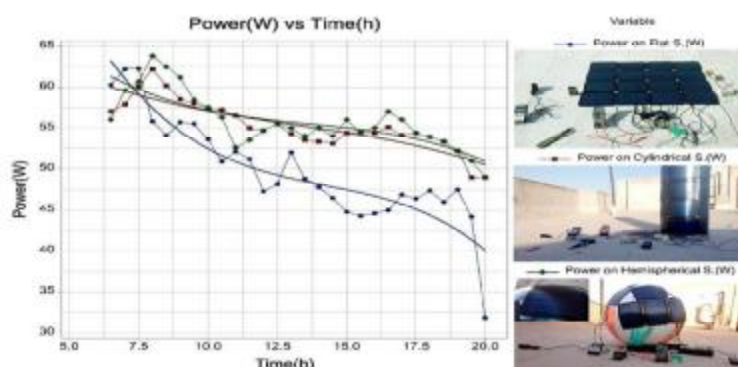
گام اول در راه‌اندازی سامانه تبدیل انرژی خورشیدی بر پایه پنل‌های خورشیدی منعطف، خرید اجزای سامانه است که در واقع هزینه ثابت سرمایه‌گذاری می‌باشد. طبق تحقیقات بعمل آمده، هزینه (قیمت تمام شده) پنل‌های فتوولتائیک منعطف در مقیاس کوچک معادل ۰/۸ دلار به ازای هر وات می‌باشد. بنا براین، ۵۶ وات معادل ۱۵۶۸۰۰۰ ریال در سال ۱۳۹۵ می‌باشد. سرعت کاهش رشد قیمت محصولات فتوولتائیک لایه نازک چشمگیر می‌باشد، لکن علاوه بر پنل، تجهیزات دیگری نیز در سامانه فتوولتائیک منعطف به کار می‌رود. هزینه کل سامانه فتوولتائیک منعطف شامل خرید پنل‌ها، هزینه نصب (بدون نیاز به سازه)، مالیات، باتری، اینورتر و ... بر اساس استاندارد در پروژه‌های فتوولتائیک 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 ۵۰۰۰۰۰ 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 فتولتاییک منعطف متشکل 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 cm^2 محاسبه شد. بنابراین، سطح فتولتاییک S_f مؤثر در روابط طراحی الکتریکی با حذف حاشیه غیرمؤثر برابر 6996 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 کره‌ای

با درک مقدار واریانس و منبع ایجاد واریانس، شرایط بهترین عملکرد در سامانه‌ها، به‌طور همزمان پیش‌بینی شد که این از مزیت‌های استفاده از این روش آزمایش برای سامانه می‌باشد. جدول (۳) متغیرهای آزمایش و سطوح آزمون را برای ارزیابی سامانه منعطف خورشیدی نشان می‌دهد. در این آزمایش، ۴ متغیر انتخاب شد، متغیر توان تابشی در ۶ سطح و متغیرهای 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 نیم‌کره و سطح (۳) قوس کمان مربوط به آزمون سامانه در حالت استقرار بر روی سطح استوانه‌ای می‌باشد. متغیر توان تابشی، از طلوع خورشید تا غروب خورشید از ۰ تا ۱۲۰۰ وات بر مترمربع دسته‌بندی شده که مجموعاً 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 تاگوجی سامانه منعطف خورشیدی با چهار متغیر، نهایتاً ۱۸ آزمایش انجام شد که جدول (۴) آرایه‌های متعامد آزمایش‌های تاگوجی برای طرح $\{L_{18}(3^4)\}$ را به همراه نتایج توان و عملکرد سامانه نشان می‌دهد.

جدول ۳. متغیرها و سطوح آزمایش در طرح آزمایش‌های تاگوجی

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

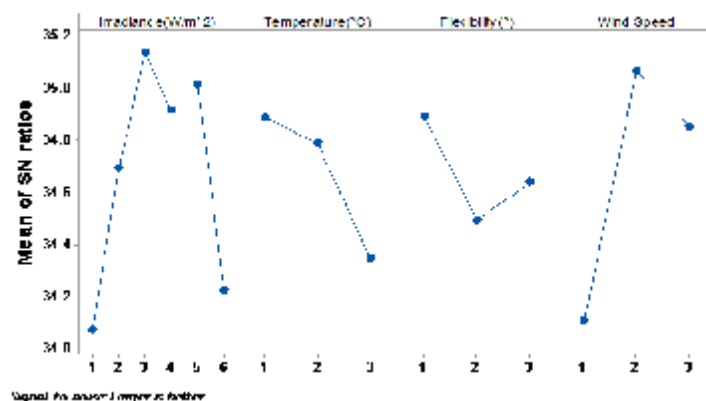
مأخذ: یافته‌های تحقیق

جدول ۴. آرایه‌های متعامد آزمایش‌های تاگوچی و پاسخ آنها

متغیر آزمایش	تابش (W/m^2)	دما ($^{\circ}C$)	سرعت باد (m/s)	قوس ($^{\circ}$)	توان (W)	راندمان (%)
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	۳	۲	۵۸/۴	۱۵/۶
۹	۳	۳	۱	۳	۵۸	۱۶/۳
۱۰	۴	۱	۳	۳	۵۶	۱۱/۶
۱۱	۴	۲	۱	۱	۵۵/۵	۱۸/۸
۱۲	۴	۳	۲	۲	۵۵/۵	۷/۴
۱۳	۵	۱	۲	۳	۵۷/۶	۹/۹
۱۴	۵	۲	۳	۱	۵۵	۹/۶
۱۵	۵	۳	۱	۲	۵۶/۳	۹/۵
۱۶	۶	۱	۳	۲	۵۵/۵	۷/۵
۱۷	۶	۲	۱	۳	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 SNr^1 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، نزدیکی 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 عملاً توان بیشتری در اختیار قرار می‌گیرد. لازم به توضیح است که بررسی و تحلیل عملکرد (راندمان) سامانه فتوولتائیک 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 به‌نوعی 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 نیم‌کره 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 با W ۵۴/۰۵ با $SNr = ۳۴/۶۳۶۸$ می‌گردد. این میزان برای سطح نیم‌کره معادل توان W ۵۴/۷ با $SNr = ۳۴/۸۸۸۰$ محاسبه شد.

جدول ۵. نسبت سیگنال به نویز میانگین در آزمایش‌های تاگوچی

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

مأخذ: 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. همچنین خالص ارزش فعلی سامانه منعطف در حالت استقرار بر روی سطوح استوانه‌ای و نیم‌کره به ترتیب معادل ۹/۹۵۲ ریال و ۱۰/۸۳۰ ریال و نرخ بازده داخلی آنها ۲۶/۷۰ درصد و ۲۷/۴۶ درصد و دوره بازگشت سرمایه به ترتیب برابر ۸/۲۴ 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 جذب‌کننده برای یک پروژه کوچکتر از صفر باشد، آن پروژه غیراقتصادی خواهد بود و مشخص‌کننده 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 جذب‌کننده برای سرمایه‌گذار تأمین شده است. نمودار شکل (۴) NPV طرحها را به ازای نرخ تنزیل مختلف در سه سطح برآزش سامانه‌های منعطف خورشیدی بر روی سطوح تخت، استوانه‌ای و نیم‌کره 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.

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

۴) 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.

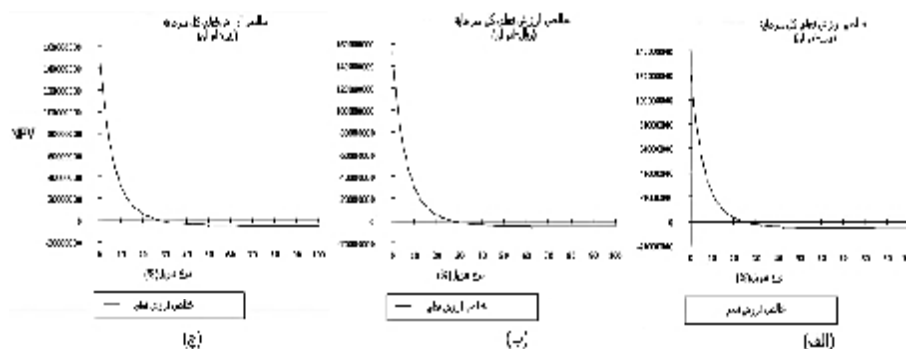
تحلیل نرخ بازده داخلی (IRR)

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)

خالص ارزش فعلی با تورم	نرخ بازده داخلی با تورم	طرح فتوولتائیک
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

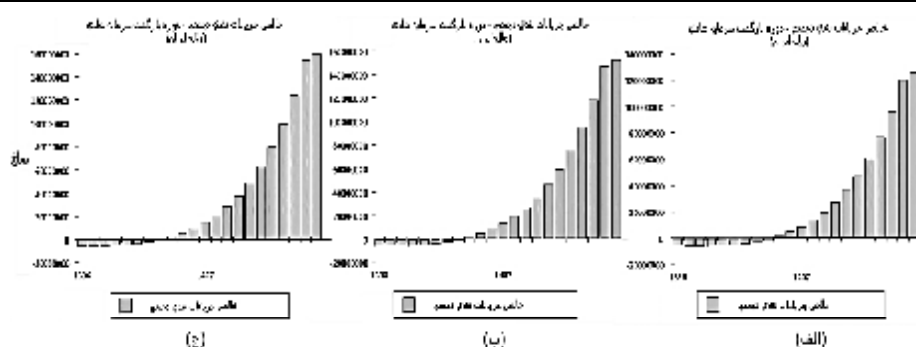
مأخذ: یافته‌های تحقیق



شکل ۴. نتایج خالص ارزش فعلی 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 ۸/۰۲ 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 استوانه‌ای و نیم کره، ۸ سال می‌باشد (PP عادی سرمایه در سامانه مستقر بر روی سطح نیم کره معادل ۸/۰۷ 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 نیم‌کره)

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه بررسی توجیه‌پذیری 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 توجیه‌پذیری خارج نکند، سرمایه‌گذاری با اطمینان بیشتری انجام خواهد شد.

به منظور لحاظ کردن عوامل در نظر گرفته نشده و یا ریسک عواملی که بازده پروژه را با خطر مواجه می‌کنند، میزان حساسیت شاخص‌های پروژه نسبت به این عوامل به‌طور تقریبی برآورد می‌شود. بدین منظور، حساسیت شاخص‌های پروژه نسبت به تغییرات درآمدها 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 تخت			سطح استوانه‌ای			سطح نیم کره					
	۲۰	۱۰	-۲۰	۲۰	۱۰	-۲۰	۲۰	۱۰	-۲۰			
ارزش فعلی پروژه (میلیون ریال)	۵/۰۸۱	۶/۲۲۶	۵/۷۶۸	۷/۰۰۵	۸/۲۸۶	۹/۴۳۱	۸/۹۷۳	۱۰/۲۱۰	۹/۱۶۴	۱۰/۳۰۹	۹/۸۵۱	۱۱/۰۸۸
نرخ بازدهی داخلی (درصد)	۲۱/۳۰	۲۲/۹۴	۲۲/۲۴	۲۴/۳۰	۲۳/۸۳	۲۵/۶۹	۲۴/۸۹	۲۷/۲۶	۲۴/۴۸	۲۶/۴۱	۲۵/۵۹	۲۸/۰۳
تغییرات درآمد ثابت (درصد)	۲۰	۱۰	-۲۰	۲۰	۱۰	-۲۰	۲۰	۱۰	-۲۰	۲۰	۱۰	-۲۰
ارزش فعلی پروژه (میلیون ریال)	۱۲/۴۰۲	۸/۵۱۴	۱۰/۰۶۹	۵/۸۷۰	۱۶/۶۳۳	۱۲/۰۴۰	۱۳/۸۷۷	۸/۹۱۶	۱۷/۷۹۲	۱۳/۰۰۵	۱۴/۹۲۰	۹/۷۵۰
نرخ بازدهی داخلی (درصد)	۲۸/۷۹	۲۵/۴۳	۲۶/۸۱	۲۲/۹۹	۳۲/۲۳	۲۸/۴۹	۳۰/۰۱	۲۵/۷۹	۳۳/۱۴	۲۹/۲۹	۳۰/۸۶	۲۶/۵۳

مأخذ: یافته‌های تحقیق

به این ترتیب، در سامانه در حالت استقرار بر روی سطح تخت ۲۰ درصد افزایش در هزینه‌های پروژه، نرخ بازده داخلی را 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	خالص ارزش فعلی
تخت	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 درحالی که کمینه توان معادل ۴۶/۷۱ وات مربوط به سامانه در حالت استقرار بر روی سطح تخت می‌باشد. عملکرد سامانه‌ها در شرایط استاندارد (دمای 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 نیم‌کره به ترتیب ۲۳/۸۲ و ۲۶/۷۰ و ۲۷/۴۶ درصد می‌باشد و خالص ارزش فعلی برابر با ۶/۷۴۷ میلیون ریال و ۹/۹۵۲ میلیون ریال و ۱۰/۸۳۰ 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 نیم‌کره، استوانه‌ای و تخت طبقه‌بندی می‌گردند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان 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)، "ارزیابی لایه نازک کربن شبه الماسی اعمال شده به روش رسوب شیمیایی بخار تقویت شده با پلازما بر عملکرد سلول خورشیدی سیلیکونی"، *مجله مواد نوین*، شماره ۴، جلد ۵، صص ۱۶۴-۱۵۵.
- اسکونزاد، م (۱۳۸۳)، *اقتصاد مهندسی*، تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، چاپ اول.
- ربیعی، م (۱۳۹۱)، "تامین سه درصد از کل انرژی کشور با منابع تجدید پذیر"، *ماهنامه بین المللی آموزشی، پژوهشی تحلیل و اطلاع رسانی پیام سبز*، شماره ۱۰۶، آبان ۱۳۹۱.
- رئوفی 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 ترموهیدرولیکی 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 بهره‌وری انرژی ایران (سابا) (۱۳۹۵)، روند مصرف انرژی در ایران.
- سایت سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری 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، پروژه تحقیقاتی شرکت برق منطقه‌ای خوزستان، ۱۳۹۰-۱۳۹۱، صص ۳۸-۳۳.
- هور، م؛ ریاحی نوری، ن؛ و پ. امامقلی زاده سیار (۱۳۹۱)، "به کارگیری روش طراحی آزمون تاگوچی در سنتز نانو پودر دی‌اکسید تیتانیم به روش سل - ژل مورد استفاده در سلول‌های خورشیدی"، *بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق-تهران*، صص ۸-۱.
- محمودی، م؛ صادقی، م. و ف. فرهادپور (۱۳۹۰)، "شناسایی رژیم‌های جریان دوفازی و محاسبه افت فشار در چاه‌های تحت فراآوری با گاز"، *نشریه پژوهش نفت*، شماره ۶۸، صص ۷۰-۵۷.

مهدوی عادل، م؛ سلیمی فر، م. و ا. قزلباش (۱۳۹۳)، "ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی برق خورشیدی (فتوولتاییک) 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؛ جلیل‌وند، ا؛ نوروزیان، ر. و م. ولی‌زاده (۱۳۸۹)، "طراحی بهینه و مدیریت هوشمند انرژی سیستم هیبرید مستقل 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; Ameer, 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/Pdt/Solar-Modules/1004041898.Htm](http://www.globalsources.com/Si/As/Tianjin-Jinneng/6008815379287/Pdt/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.

