

## آزمون فنی اقتصادی سامانه خورشیدی انعطاف پذیر با روش تاگوچی در کشور ایران

مصطفی اسماعیلی شایان<sup>۱</sup>، غلامحسین نجفی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

e.mostafa@modares.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

najafi14@gmail.com

چکیده: به منظور شناخت دقیق محدودیت‌ها، موانع و امکانات موجود در جهت استفاده از منابع انرژی در هر کشور، ضروری است میزان بهره‌برداری از پتانسیل‌های موجود انرژی و روند تبدیل این انرژی‌ها، به روش علمی و دقیق، محاسبه و ارزیابی گردد. سامانه‌های متداول فتولتائیک امکان استفاده در سطوح منحنی را محدود کرده‌اند. در این تحقیق، سامانه فتولتائیک بر پایه پنل‌های خورشیدی منعطف در مقیاس کوچک طراحی، ساخت و مورد ارزیابی فنی اقتصادی قرار گرفت. نظر به اهمیت متغیرهای اثرگذار، سامانه سنجش دما برای دریافت برخط داده‌ها و ارتباط با نرم‌افزار لب‌ویو طراحی و ساخته شد و داده‌های ایستگاه هواشناسی و ناسا به دست آمد. تحلیل تاگوچی با مشخصه هدف «هرچه اقتصادی‌تر، بهتر» برای انتخاب سامانه برتر به کار گرفته شد. تحلیل هزینه - فایده سامانه‌ها در نرم‌افزار کامفار، انجام شد. نرخ بازده داخلی در حالت استقرار بر روی سطح تخت، استوانه‌ای و نیم‌کره به ترتیب ۲۳/۸۲ و ۲۶/۷۰ و ۲۷/۴۶٪ بوده و خالص ارزش فعلی برابر با ۶/۷۴ و ۹/۹۵ و ۱۰/۸۳ میلیون ریال است. چنان‌که سامانه بر روی سطح تخت در شرایط استاندارد، دارای فاکتور پوشش ۰/۷۳ و قابلیت تولید توان بیشینه معادل ۴۶/۷۱ W با عملکرد ۷/۰۹٪ است. سامانه مستقر بر روی سطح استوانه و نیم‌کره به ترتیب دارای فاکتور پوشش ۰/۸۸ و ۰/۸۴ بوده و قابلیت تولید توان بیشینه به ترتیب ۵۵/۱۸ W و ۵۷/۵۰ W با عملکرد ۷/۴۵٪ و ۷/۵۵٪ می‌باشد. سامانه‌ها دارای توجه اقتصادی برای جذب سرمایه هستند.

کلیدواژه‌ها: فتولتائیک، لب‌ویو، تحلیل هزینه - فایده، تحلیل تاگوچی.

خود اختصاص داده است. ژاپن، آلمان، هند، ایتالیا، انگلستان، استرالیا، فرانسه و کره جنوبی است. دیگر کشورهای جهان سهم حدود ۲۰٪ را به خود اختصاص داده‌اند [۱۱]. در سبد انرژی جهان، سهم خورشید در کشور ایران ناچیز است، اما سهم این انرژی در کشورهای توسعه‌یافته بیش از ۳۰٪ است [۱۲]. برق‌رسانی روستایی در ایران با استفاده از فتولتائیک در سال ۱۳۸۵ از استان قزوین آغاز و سپس در استان‌های گیلان، زنجان، بوشهر، یزد و کردستان اجرا شد. برخی از این پروژه‌ها متناسب با الگوی اقلیمی و سازه‌های سنتی بوده‌اند. در میان نیروگاه‌های تجدیدپذیر فعال ایران، انرژی خورشیدی بدترین شرایط را دارد [۱۳].

در پژوهشی برای بررسی اقتصادی به‌کارگیری سامانه فتولتائیک در تقابل با برق فسیلی مصارف خانگی از نرم‌افزار کامفار استفاده شد [۱۴]. سامانه فتولتائیک منعطف برای جبران پیک الکتریکی با توجه به تعرفه و مقررات زمانی در جهت کاهش هزینه‌های منزل مسکونی مطالعه و به‌عنوان روش پایدار به کار گرفته شد. نتایج نشان داد نیروگاه کوچک فتولتائیک خانگی برای تأمین نیاز پیک مصرف‌خانه، اقتصادی و مقرون‌به‌صرفه است [۱۵]. در پژوهشی، عملکرد و هزینه توزیع برق در سامانه‌های متداول نیروگاهی با سامانه‌های فتولتائیک منطقه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد با کاهش سریع هزینه تمام‌شده سامانه‌های فتولتائیک، این سامانه‌ها می‌توانند در آینده نزدیک معارض اصلی نیروگاه‌های فسیلی مبنای گردند. همچنین این پژوهش نشان داد نیروگاه‌های فتولتائیک می‌توانند سالانه بین ۱۵٪ تا ۴۰٪ بازگشت سرمایه داشته باشند [۴]. در پژوهشی، ارزیابی فنی اقتصادی سامانه فتولتائیک خارج از شبکه برای مناطق و کشورهای در حال توسعه برای تأمین نیاز صنعت و خانگی بر اساس یک سناریوی ۲۰ ساله مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد حدود ۱۸٪ از جمعیت جهان دسترسی به شبکه برق ندارند و مانع اصلی استفاده از سامانه‌های فتولتائیک مستقل از شبکه برای این نواحی قیمت تمام‌شده سامانه‌هاست. فناوری‌های نوظهور فتولتائیک با هزینه‌های ساخت و به‌کارگیری بسیار پایین، توجیه اقتصادی داشته و برای مصارف نور، پخت‌وپز و حفاظت از مواد غذایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۶ و ۱۷].

یک پژوهش مفصل، استفاده از سامانه‌های فتولتائیک پوست‌محور و منعطف را برای رسیدن به اهداف توسعه پایدار در جهان الزامی می‌داند [۱۸]. آزمون استاندارد تحلیل سامانه‌های خورشیدی در فضای باز، متغیرهای اساسی ارزیابی عملکرد سامانه فتولتائیک پوست‌محور و سنتی قدیمی در حالت الکتریکی و حرارتی را مورد مطالعه و ارزیابی قرار داد [۱۹]. کاربینی و همکاران از روش طرح آزمایش تاگوچی در سلول‌های خورشیدی برای تعیین نمونه بهینه استفاده کردند. روش

با پیشرفت فناوری، انرژی خورشید مستقیماً به الکتریسیته تبدیل شده و این گام بزرگی در دریافت توان از خورشید است. فناوری فتولتائیک با پتانسیل بالا می‌تواند تا سال ۲۰۳۰، سهم ۵٪ و تا سال ۲۰۵۰ سهم ۱۱٪ از نیاز الکتریسیته در اروپا را بر عهده بگیرد [۱]. با وجود این، تنها ۱٪ از کل توان الکتریکی مورد نیاز انسان‌ها که معادل ۱۸/۴۰۰ تراوات است، از طریق سامانه‌های متنوع تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریکی تأمین می‌شود [۲ و ۳]. سوخت‌های فسیلی که بخش عمده تأمین نیاز انرژی را به خود اختصاص داده‌اند [۴]. بزرگ‌ترین چشمه نشر گازهای گلخانه‌ای هستند و بحران‌های زیست‌محیطی را منجر شده‌اند [۵]. شدت مصرف انرژی یکی از شاخص‌های بررسی کارایی مصرف انرژی است. این شاخص با تقسیم واحدی از انرژی بر واحدی از تولید ناخالص داخلی به دست می‌آید. میانگین شدت مصرف انرژی در جهان ۰/۴ و این رقم در کشور ایران بیش از ۰/۶ است [۶]. بالا رفتن مصرف انرژی، مضرات و محدودیت‌های سوخت‌های فسیلی، تمایل استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌ویژه انرژی خورشیدی را افزایش داده است [۷ و ۸]، به‌گونه‌ای که در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ سرانه تولید انرژی جهانی افزایش یافته و پیش‌بینی شده در سال ۲۰۳۰ به بیش از ۶۰٪ مقدار مصرفی در سال ۲۰۰۰ برسد [۱].

در تأمین انرژی‌های تجدیدپذیر و با توجه به پتانسیل 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 برق‌دهی به مناطق روستایی شده و از هزینه کمتری برخوردار است [۹]. مطالعات پژوهشی نشان می‌دهد تعداد روزهای آفتابی سالیانه در تهران ۳۱۳ روز و تعداد ساعات آفتابی در سال حدود ۱۷۴۲ ساعت است. به‌رغم وجود پتانسیل مطلوب انرژی خورشیدی در ایران، برخی از محدودیت‌های فنی و اقتصادی مانع بهره‌برداری مطلوب شده است. الگوی تغییر پتانسیل انرژی خورشیدی در کشور ایران از سمت جنوب شرقی به سمت شمال غربی در حال کاهش و از غرب به سمت شرق معمولاً در حال افزایش است [۹]. طراحی ساختمان‌ها معمولاً اجازه استفاده از سامانه‌های متداول خورشیدی با پنل‌های غیرقابل انعطاف را نمی‌دهد، یکی از راه‌های مطلوب، بهره‌گیری از سامانه‌های خورشیدی انعطاف‌پذیر است. این مدارها می‌توانند تجهیزاتی را که در شرایط طبیعی نیاز به توان راه‌اندازی بالاتر دارند، راه‌اندازی کنند [۱۰].

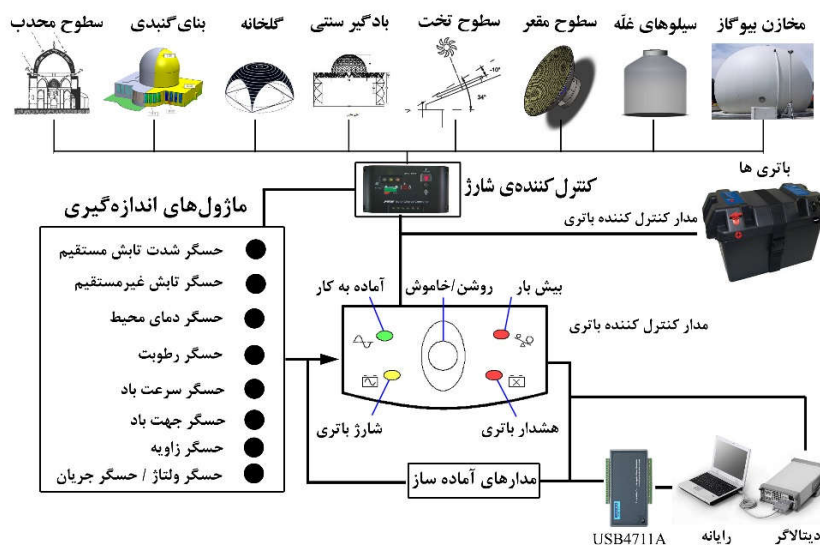
در حال حاضر، بیش از ۳۲٪ سامانه‌های خورشیدی فتولتائیک در کشور چین نصب شده است. آمریکا با بیش از ۱۱٪ سهم بعدی را به

منعطف بر روی سطوح تخت، نیم کره و استوانه‌ای است. منظور از سطح تخت، سطح مسطح با شیب صفر است.

## ۲. مود و روش‌ها

### ۱.۲. تحلیل فنی

سلول خورشیدی فتولتائیک a-Si به‌عنوان مبدل تابش به الکتریسیته در این تحقیق استفاده شد، سلول‌های منعطف با داشتن ضخامت و استحکام مناسب می‌توانند هر سازه‌ای را پوشش داده و با اتصال سری، توان بیشتری تولید کنند. سامانه تبدیل انرژی خورشیدی بر پایه پنل‌های منعطف مطابق شکل (۱) شامل سازه هندسی به‌شکل 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، فیوزهای باتری، مبدل آنالوگ به دیجیتال و رایانه است.



شکل (۱): طرح‌واره سامانه فتولتائیک منعطف و تجهیزات کنترلی

(۱) و فیلم نازک فتولتائیک بی‌شکل نسل سوم JNsolar3W-12v بر بستر پلیمر ضدزنگ و دیود قفل برای جلوگیری از تخلیه جریان باتری به سمت پنل خورشیدی در ماژول به کار گرفته شد.

نظر به ابعاد و شکل مستطیل پنل، سطح آزمون معادل ۱ مترمربع انتخاب شد [۲۱]. بهترین سطح برآزش توسط مجموعه پنل‌های خورشیدی ۱ متر، معادل  $9744 \text{ cm}^2$  و تعداد پنل‌های مورد استفاده ۱۶ عدد خواهد بود. اگر سطح حاشیه پنل از سطح کل کسر گردد، سطح فتولتائیک مؤثر در روابط طراحی الکتریکی معاد  $6996 \text{ cm}^2$  و سطح مؤثر در روابط طراحی هندسی سازه‌ها معادل  $9744 \text{ cm}^2$  است.

در اتصال ماژول LM35 دما از درگاه زنجیره RS232 و نرم‌افزار

آزمایش‌های تاگوچی ضمن کاهش تعداد آزمایش‌های دقت مطلوب برای استخراج متغیرهای مؤثر در آزمایش و نیل به هدف مورد استفاده را به ارمغان داشت [۱۷].

پنل‌های خورشیدی متداول برای نصب نیاز به سازه‌های فلزی دارد و معمولاً قابلیت تطابق با اشکال هندسی استوانه‌ای و کروی را به‌خوبی 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، اقتصادی بوده و نیاز انرژی تجهیزات الکتریکی در این سازه‌ها را تأمین کند. با توجه به ذکر اهمیت استفاده سامانه‌های فتولتائیک به‌عنوان بدنه اجسام اما در هیچ پژوهشی سامانه‌های فتولتائیک بر روی سطوح استوانه‌ای و کروی مورد ارزیابی فنی و اقتصادی قرار نگرفته‌اند. هدف از مقاله حاضر، استفاده از روش ارزیابی فنی اقتصادی تاگوچی، برای اولین بار به‌منظور رتبه‌بندی هزینه واقعی استفاده از سامانه‌های خورشیدی

جدول (۱): مشخصات المان انعطاف‌پذیر JNsolar3W-12v در شرایط استاندارد [۲۰]

مشخصه	واحد	مقدار
ابعاد (ضخامت، عرض، طول)	mm	$290 \times 210 \times 5$
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	%	۴-۸

ماژول فتولتائیک منعطف JNsolar3W-12v با مشخصات جدول

آرایه‌های متعامد آزمایش‌های تاگوچی برای طرح  $\{L18(6^3)\}$  عملکرد سامانه روی سطوح مختلف را ارزیابی کرد. ارزیابی در شهر تهران با  $35/70$  عرض جغرافیایی و  $51/25$  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 تابش‌نگار اندازه‌گیری شد. همچنین داده‌های هواشناسی از ایستگاه هواشناسی مهرآباد (با فاصله کمتر از ۵ کیلومتر) دریافت شد.

## ۲.۲. تحلیل اقتصادی

ارزیابی عملکرد اقتصادی سامانه‌های منعطف خورشیدی با تأکید بر علم اقتصاد مهندسی صورت گرفت. اقتصاد مهندسی در قالب تحلیل اقتصادی پروژه، به‌کارگیری فن‌های ریاضی و معیارهای کمی ارزیابی، به بررسی پروژه‌های مختلف سرمایه‌گذاری و انتخاب اقتصادی‌ترین آن‌ها و یا تصمیم‌گیری برای رد یا پذیرش اجرای پروژه خاص می‌پردازد [۱۴]. در این تحقیق، از نرم‌افزار کامفار نسخه ۳ استفاده شده است. معیارهای اقتصاد مهندسی که در آزمون عملکرد اقتصادی استفاده شده، به شرح زیر است.

### ۲.۲.۱. معیار ارزش خالص فعلی

معیار  $(NPV)^3$  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 به‌کارگیری وجوه، از قبل تعیین کرده است. به این بهره، «حداقل بهره قابل جذب» یا «هزینه سرمایه» می‌گویند.

ارزش فعلی مجموعه‌ای از جریان‌ات وجوه نقد آینده از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$NPV = NCF_0 + \frac{NCF_1}{(1+i)} + \frac{NCF_2}{(1+i)^2} + \frac{NCF_t}{(1+i)^t} \quad (3)$$

در رابطه فوق،  $NPV$  برابر خالص ارزش فعلی،  $NCF$  برابر خالص وجوه نقد،  $i$  برابر نرخ تنزیل و  $t$  برابر دوره مالی است.  $NPV$  ممکن است یک عدد منفی (عدم انتخاب پروژه) یا یک عدد مثبت (انتخاب پروژه) باشد. در صورتی که خالص ارزش فعلی مساوی با صفر گردد، طرح در انتخاب یا عدم انتخاب انجام پروژه بی تفاوت خواهد بود. اگر محاسبات نشان دهد با اعمال نرخ تنزیل مشخص

LabVIEW استفاده شد. در سامانه منعطف خورشیدی، دمای محیط، دمای سطح و کف پنل‌های خورشیدی به صورت برخط توسط حسگرهای معرفی شده، دریافت و مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین داده‌های دما توسط دماسنج لیزری شرکت Raytek در فاصله زمانی ۳۰ دقیقه از طلوع تا غروب خورشیدی برای محیط، سطح آرایه‌های خورشیدی و کف آن‌ها اندازه‌گیری و ثبت شد. دقت اندازه‌گیری دماسنج  $0/1$  درجه سلسیوس است. میکروکنترلر، هر ۵۰ میلی‌ثانیه اطلاعات ۱۶ حسگر دما را از طریق ارتباط سریال به LabVIEW ارسال کرده و هر ۳۰ دقیقه داده‌ها را در فایل اکسل با زمان واقعی ذخیره می‌کند. سرعت باد بر روی سامانه‌ها از دو طریق، دریافت داده از ایستگاه هواشناسی و اندازه‌گیری مستقیم توسط دستگاه دماسنج - بادسنج لوترون با مدل AM-4202 اندازه‌گیری به دست آمد. دقت اندازه‌گیری بادسنج  $0/1$  متر بر ثانیه گزارش شده است. بیشینه توان پنل خورشیدی از حاصل ضرب مقدار ولتاژ (در حالت مدار باز) در مقدار جریان (در حالت اتصال کوتاه) در ضریبی به نام فاکتور پوشش<sup>۱</sup> به دست می‌آید. فاکتور پوشش (FF) مطابق با رابطه (۱) بر روی سطوح محاسبه شد [۲۲]. بهره‌وری سامانه فتوولتائیک، یکی از مهم‌ترین متغیرهای ارزیابی در فضای باز است. عملکرد (یا بهره‌وری) یا عملکرد عمومی ( $\eta$ ) از طریق رابطه (۲) محاسبه شد [۱۹].

$$FF = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P/S_t}{I} \quad (2)$$

در رابطه فوق،  $I$  تابش کل بر روی سطح آرایه با واحد  $W/m^2$  و  $S_t$  سطح آرایه فتوولتائیک با واحد  $m^2$  و  $P$  توان سامانه در نقطه دلخواه با واحد  $W$  است. با استفاده از این رابطه شاخص‌بندی، محاسبه اتلاف توان در حالت سایه‌اندازی، تغییرات دمایی، افت گردوخاک، بازتاب نور و تابش بر روی پنل خورشیدی استفاده شد. 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 و تغییرات متغیرهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل برای هر سطح تماس به صورت جدا مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت توسط روش تاگوچی سامانه بهینه ارزیابی شده است. طرح آزمایش آرایه متعامد تاگوچی<sup>۲</sup> سامانه منعطف خورشیدی با چهار متغیر، نهایتاً با ۱۸ آزمایش انجام شد.

1. Fill Factor(FF)
2. Taguchi Orthogonal Array Design

3. Net present value

به عنوان حداقل نرخ جذب کننده سرمایه گذار، شاخص خالص ارزش فعلی برای یک پروژه با اعمال تورم، رقمی مثبت باشد، 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 می کند.

### ۲.۲.۲. نسبت منفعت - هزینه

نسبت منفعت - هزینه در واقع نسبت مجموع ارزش فعلی درآمدهای 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 هاست.

### ۳.۲.۲. معیار نرخ بازده داخلی

IRR<sup>۱</sup> معیار مشهوری در ارزیابی اقتصادی پروژه هاست. این معیار شرط پذیرش پروژه را بزرگ تر بودن IRR از هزینه سرمایه<sup>۲</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 برده شده، بیشتر است. در محاسبه NPV فرض بر این است که نرخ تنزیل مشخص است و NPV پروژه تعیین می شود. در محاسبه IRR، NPV پروژه معادل صفر قرار گرفته و نرخ تنزیل که همان IRR پروژه است، تعیین شده است.

### ۴.۲.۲. معیار دوره بازگشت سرمایه

با استفاده از معیار دوره بازگشت سرمایه<sup>۳</sup> (PP)، دوره ای که در آن مجموع درآمدهای سالیانه با هزینه سرمایه گذاری برابر (سربه سر) مشخص می شود. منظور از دوره بازگشت سرمایه متحرک، ارزش زمانی پول بر اساس داده های تنزیل شده است. محصول تولیدی این پروژه، برق است که سامانه های منقطع خورشیدی به اندازه ظرفیت اسمی تولیدی، برق تولید می کنند. همچنین طول دوره ساخت پروژه شامل خرید و نصب تجهیزات یک سال در نظر گرفته شده است. طول دوران بهره برداری یا عمر مفید سامانه ها معادل ۲۰ سال است. نرخ تورم در نظر گرفته شده در این بخش بر اساس متوسط میزان تورم در پنج سال اخیر بین سال های ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۶ مربوط به دسته کالاهای آب، برق و سوخت به طور متوسط ۱۰ بوده که در این مطالعه نیز همین میزان در نظر گرفته شده است [۲۴]. نرخ سود سپرده گذاری (سپرده های دیداری) در ایران به تازگی کاهش یافته و به عدد ۱۵٪

رسیده است اما طی ۱۰ سال گذشته، دارای میانگین ۱۶/۷٪ بوده که در این تحقیق به عنوان نرخ تنزیل معیار در نظر گرفته شده است [۲۴]. بر طبق مصوبه مجلس ایران هر کیلووات برق تجدیدپذیر معادل ۸۰۰۰ ریال از مصرف کننده خریداری می شود، که این قیمت برای ۲۰ سال عمر مفید سیستم خورشیدی در نظر گرفته شده است [۱۱]. بنابراین سامانه های منقطع بر اساس عملکرد در شرایط پیشینه تولید توان می تواند درآمدی متفاوت در هر حالت استقرار روی سطوح مختلف مطابق با جدول (۲) داشته باشد.

جدول (۲): هزینه برق خورشیدی سامانه ها بر روی سطوح مختلف

برق خورشیدی	درآمد (کیلووات × ریال)	درآمد سالانه (ریال)
سطح تخت	۸۰۰۰ × ۸۱/۳۶۹	۶۵۰۹۵۲
سطح استوانه ای	۸۰۰۰ × ۹۶/۱۲۴	۷۶۸۹۹۲
سطح نیم کره	۸۰۰۰ × ۱۰۰/۱۶۵	۸۰۱۳۲۰

### ۵.۲.۲. هزینه و فایده سامانه های منقطع خورشیدی

گام اول در راه اندازی سامانه تبدیل انرژی خورشیدی بر پایه پنل های خورشیدی منقطع، خرید اجزای سامانه است که در واقع هزینه ثابت سرمایه گذاری است. هزینه (قیمت تمام شده) پنل های فتوولتائیک منقطع در مقیاس کوچک معادل ۰/۸ دلار به ازای هر وات است؛ بنابراین ۵۶ وات معادل ۱۵۶۸۰۰۰ ریال در سال ۱۳۹۵ است. سرعت کاهش رشد قیمت محصولات فتوولتائیک لایه نازک سریع است. لکن علاوه بر پنل، تجهیزات دیگری نیز در سامانه فتوولتائیک منقطع به کار می رود. هزینه کل سامانه فتوولتائیک منقطع شامل خرید پنل ها، هزینه نصب و... بر اساس استاندارد در پروژه های فتوولتائیک حاضر ۵۴۵۳۳۵۰ ریال برآورد می شود [۲۵]. هزینه های پیش بینی نشده شامل هزینه های چسب برای تماس مجدد پنل ها با سطوح و هزینه تعمیر و نگهداری و خاک زدایی در نظر گرفته شده است. هزینه تعمیر و نگهداری در طول عمر مفید سامانه خورشیدی ده میلیون ریال فرض شده است.

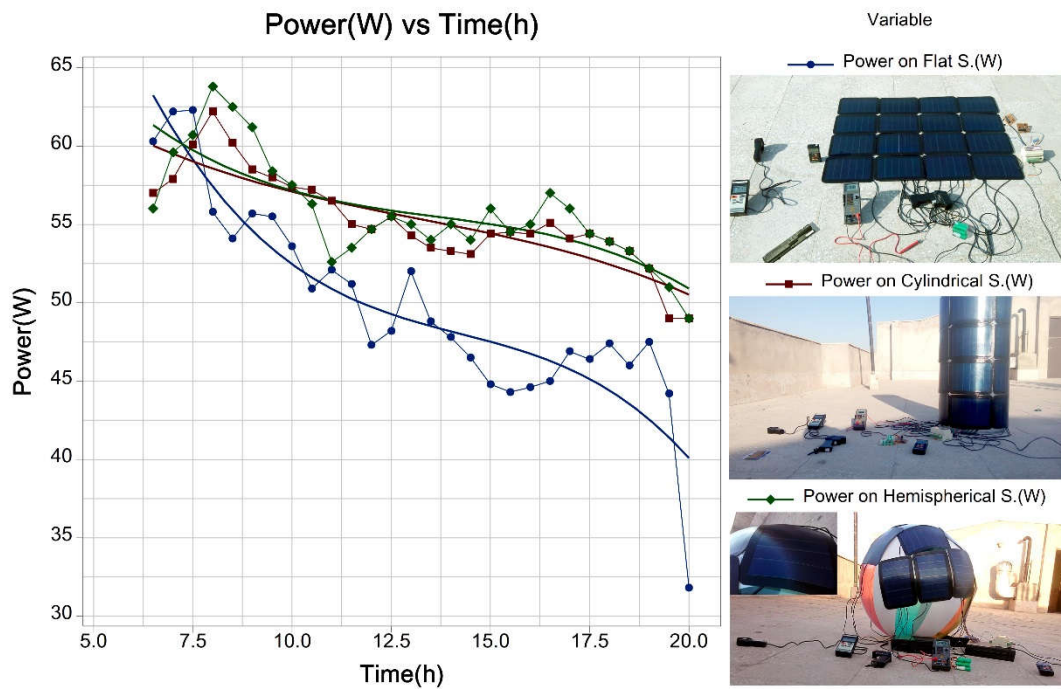
## ۳. نتایج و بحث

### ۱.۳. نتایج فنی

آرایه فتوولتائیک منقطع متشکل از ۱۶ پنل خورشیدی منقطع مدل JNPsolar3W-12V به صورت سری بر روی سطوح مختلف متصل شده اند. شکل (۲) تحلیل توان آرایه منقطع را در حالت استقرار بر روی سطوح مختلف نشان می دهد.

با درک مقدار واریانس و منبع ایجاد واریانس، شرایط بهترین عملکرد در سامانه ها، به طور هم زمان پیش بینی شد که این از مزیت های استفاده از روش آزمایش تاگوچی برای سامانه است.

1. Internal Rate of Return
2. Cost of Capital
3. Payback Period



شکل (۲): تحلیل توان آرایه منعطف در حالت استقرار بر روی سطوح مختلف

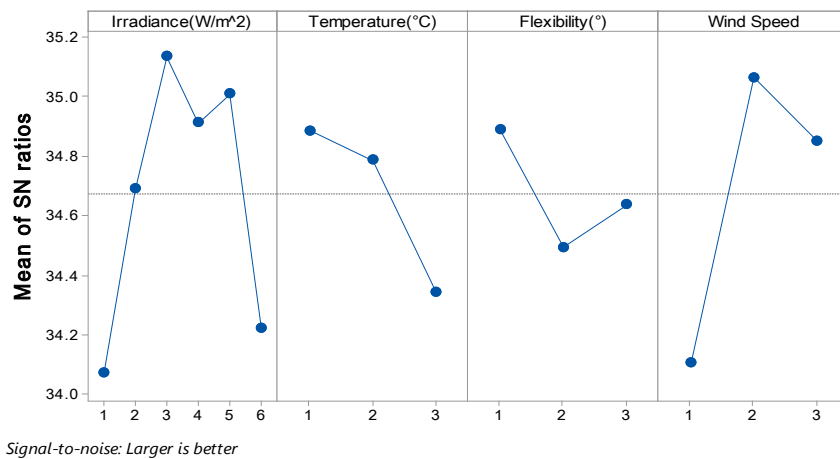
در شکل (۳)، تمام متغیرهای تابش، دما، انعطاف پذیری (زاویه) و سرعت باد مشخص است. در محور طول‌ها نمودار سطوح متغیرها مشخص است. محور عمودی میانگین  $SNr$  را نشان می‌دهد. در این آزمون، توان بر اساس «بیشتر، بهتر» مورد ارزیابی قرار گرفته است. محور عمودی در حالت عمومی هرچه  $SNr$  بیشتر باشد، نزدیکی به هدف را نشان می‌دهد و فرقی بین انتخاب «بیشتر، بهتر» و «یا کمتر، بهتر» نخواهد بود. اگر تابش در سطح (۱) باشد، عملاً توان بیشتری در اختیار قرار می‌گیرد. تابش خصوصیت مشترکی بر روی سامانه‌ها تا سطح (۳) یعنی تابش در محدوده  $\frac{W}{m^2}$  ۶۰۰ - ۴۰۰ خواهد داشت، پس از آن کمی تأثیرپذیری کاهش یافته اما هنوز برای سامانه بهینه بوده و هدف را ارضا می‌کند. 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 تابشی و  $SNr$  آن مشاهده می‌شود توان تابشی با فاصله‌گیری از خط میانی و شکستی زیاد، می‌تواند بر هدف که پتانسیل 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.

قوس کمان در سطح (۱) معادل آزمون سامانه در حالت تخت بوده و سطح (۲) مربوط به آزمون سامانه بر روی سطح نیم‌کره و سطح (۳) قوس کمان مربوط حالت استقرار بر روی سطح استوانه‌ای است. متغیر توان تابشی، از طلوع خورشید تا غروب خورشید از ۰ تا ۱۲۰۰ وات بر مترمربع دسته‌بندی شده که در مجموع، در ۶ سطح مورد آزمون و تحلیل قرار گرفته است. متغیر دما در سه سطح از دمای محیطی ۲۰ درجه سلسیوس تا ۵۰ درجه سلسیوس در آزمون مشارکت دارد. متغیر سرعت باد در سه سطح صفر تا ۳ متر بر ثانیه در آزمون مشارکت دارد. اگر طرح آزمایشی تاگوچی بر مبنای قابلیت تولید بیشترین توان به کار گرفته شود، خروجی تحلیل آزمایش مطابق با شکل (۳) خواهد بود.

جدول (۳): متغیرها و سطوح آزمایش در طرح آزمایش‌های تاگوچی

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

### 1. Signal to Noise ratio



شکل (۳): میانگین اثرات آزمایش تاگوچی (نسبت سیگنال به نویز)

ارزش فعلی سامانه منقطع 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 است. همچنین خالص ارزش فعلی سامانه منقطع 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 است. نکات قابل توجه در ازای نرخ تنزیل مختلف در سه سطح برازش سامانه‌های منقطع خورشیدی عبارت‌اند از:

۱. با افزایش نرخ تنزیل،  $NPV$  برای هر سه سامانه کاهش می‌یابد.
  ۲. سامانه مستقر بر روی سطح تخت در نرخ تنزیل ۲۳٪ پروژه، ارزش فعلی هزینه‌ها و درآمد طرح برابر شده است.
  ۳. سامانه مستقر بر روی سطح استوانه در نرخ تنزیل ۲۶٪ پروژه، ارزش فعلی هزینه‌ها و درآمد طرح برابر شده است.
  ۴. سامانه مستقر بر روی سطح نیم‌کره در نرخ تنزیل ۲۷٪ پروژه، ارزش فعلی هزینه‌ها و درآمد طرح برابر شده است.
- با افزایش نرخ تنزیل از ۲۳٪ به بالا در سطح تخت، ۲۶٪ به بالا در سطح استوانه‌ای و ۲۷٪ به بالا در سطح نیم‌کره، ارزش فعلی هزینه‌ها بیشتر از ارزش فعلی درآمدهاست. به عبارت دیگر پروژه غیراقتصادی می‌شود. نرخ بازده داخلی درآمدها و هزینه‌های پروژه را به تعادل می‌رساند. شاخص‌های تنزیلی پروژه در حالت اصلی با حداقل نرخ جذب‌کننده ۱۶/۷٪ به شرح جدول (۴) است.

جدول (۴): شاخص‌های تنزیلی در سامانه‌ها (میلیون ریال)

طرح برق فتوولتائیک	بازده داخلی با تورم	خالص ارزش فعلی با تورم
سطح تخت	۲۳/۸۲	۶/۷۴۷
سطح استوانه‌ای	۲۶/۷۰	۹/۹۵۲
سطح نیم‌کره	۲۷/۴۶	۱۰/۸۳۰

تغییرات در سرعت باد از سطح (۱) تا سطح (۲) در هدف سامانه بسیار مؤثر بوده و توانست شرایط را به‌نوعی برای تولید توان در دماهای بالای محیطی تغییر دهد. انعطاف‌پذیری یا زاویه سامانه فتوولتائیک نشان داد تغییر این فاکتور 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. به‌کارگیری سامانه بر روی سطح (۲) یعنی استفاده از سامانه روی سطح کروی با اینکه هدف تولید توان را در نزدیکی میانگین خواهد داشت، نسبت به سطوح (۱) و (۳) بهینه است. سطح (۳) یعنی به‌کارگیری سامانه بر روی استوانه نسبت به سطح تخت بهینه‌تر بوده اما تولید توان در سطح (۲) بیشینه است. بنابراین استفاده از سامانه در حالت تخت بر روی پشت‌بام مانند ایزوگام دارای اولویت نیست. همچنین اگر در مزرعه‌ای یا منطقه‌ای هم‌زمان دارای سیلوی انبار غله، سطح استوانه‌ای و مخزن بیوگازسوز یا سطوح نیم‌کره باشیم، در این شرایط ترجیح استفاده از سامانه در سطح نیم‌کره یعنی مخزن بیوگاز (بام‌های نیم‌کره، گنبد و...) خواهد بود. 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 به‌کارگیری بر روی سطوح مختلف همچون سطح تخت، استوانه‌ای و کروی می‌باشد.

## ۲.۳. نتایج تحلیل اقتصادی

نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی در نرم‌افزار کامفار نشان داد خالص

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  $57/50$  وات بوده در حالی که کمینه توان معادل  $46/71$  وات مربوط به سامانه در حالت استقرار بر روی سطح تخت است. عملکرد سامانه‌ها در شرایط استاندارد (دمای  $25$  درجه سلسیوس و توان تابشی  $1000$  وات بر مترمربع) برای حالت استقرار بر روی سطوح استوانه و نیم کره برابر و معادل  $7/45\%$  محاسبه شده است. کمینه عملکرد معادل  $7/09\%$  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  $185/696$  ولت و  $0/3465$  آمپر اندازه گیری شد. همچنین بیشینه جریان تولیدی در حالت استقرار سامانه بر روی سطح نیم کره معادل  $0/36$  آمپر به دست آمد. بنابراین سامانه در حالت استقرار بر روی سطح نیم کره با دریافت تابش های پخشی علاوه بر تابش عمودی دارای مشخصه های الکتریکی و کیفیت بهینه نسبت به سطوح استقرار دیگر است. اولویت دوم و سوم به ترتیب مربوط به استوانه و تخت است.

نتایج آنالیز اقتصادی سامانه‌ها نشان می دهد که نرخ بازده داخلی در سامانه منعطف خورشیدی در حالت استقرار بر روی سطح تخت، استوانه‌ای و نیم کره به ترتیب  $23/82$  و  $26/70$  و  $27/46\%$  است 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 برای جذب سرمایه به ترتیب اولویت استفاده از سامانه‌های منعطف بر روی سطوح به ترتیب نیم کره، استوانه‌ای و تخت طبقه بندی می شوند.

### فهرست علائم

$FF$	فاکتور پوشش (%)
$S$	ضخامت، عرض، طول (mm)
$P$	توان در نقطه بیشینه (W)
$V$	ولتاژ مدار باز (V)
$I$	جریان اتصال کوتاه (A)
$V$	ولتاژ در نقطه بیشینه (V)
علائم یونانی	
$\eta$	عملکرد (%)
زیر نویس‌ها	
$MPP$	نقطه بیشینه توان
$OC$	هوا
$SC$	مقدار متوسط
$T$	زمان

دوره ساخت و راه اندازی 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  $9/24$ ، سال  $8/24$  و سال  $8/02$  تا پایان دوران بهره برداری، خالص جریانات تجمعی طرح‌ها مثبت و به طور یکنواخت در حال افزایش است. همچنین بازگشت سرمایه عادی در حالت استقرار بر روی سطح تخت،  $9$  سال و در حالت استقرار بر روی سطوح استوانه و نیم کره،  $8$  سال است.

### ۴. جمع بندی و نتیجه گیری

توجیه پذیری طرح‌ها معمولاً در حالت عدم اطمینان انجام می شود، تحلیل حساسیت معیار مهمی در بررسی ریسک سرمایه گذاری به حساب می آید. در واقع، در تحلیل حساسیت، با تکرار محاسبات مالی از طریق تغییر متغیرهای اثرگذار بر نتایج ارزیابی، نتایج به دست آمده با نتایج اولیه مورد مقایسه قرار می گیرد. اگر تغییرات ایجاد شده در متغیرها، توجیه پذیری طرح را تغییر ندهد، سرمایه گذاری 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 می کنند، میزان حساسیت شاخص های پروژه نسبت به این عوامل به طور تقریبی برآورد می شود. به این ترتیب، در سامانه در حالت استقرار بر روی سطح تخت  $20\%$  افزایش در هزینه های پروژه، نرخ بازده داخلی را  $21/30\%$  افزایش داده و  $20\%$  کاهش در میزان درآمدها، منجر به کاهش نرخ بازده داخلی پروژه به  $22/99\%$  می شود. همچنین در سامانه خورشیدی منعطف در حالت استقرار بر روی سطح استوانه‌ای و نیم کره با افزایش  $20$  درصدی هزینه های پروژه، به ترتیب نرخ بازده داخلی به  $25/69\%$  و  $24/48\%$  و با کاهش  $20$  درصدی درآمدها، کاهش نرخ بازده داخلی پروژه به ترتیب برابر  $25/79\%$  و  $26/53\%$  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 (۵) خلاصه نتایج آزمون تحلیل فنی اقتصادی سامانه‌ها را نشان می دهد.

جدول (۵): خلاصه ارزیابی رفتار توان سامانه‌ها «هرچه بیشتر، بهتر»

سامانه	توان	ولتاژ جریان باز	جریان مدار کوتاه	نرخ بازده
تخت	$46/71$	$185/696$	$0/3465$	$23/82$
استوانه‌ای	$55/18$	$179/04$	$0/35$	$26/70$
کروی	$57/50$	$178/496$	$0/36$	$27/46$

کمینه فاکتور پوشش مربوط به سطح تخت بوده و سامانه در حالت استقرار بر روی سطوح استوانه و نیم کره دارای فاکتور پوشش به ترتیب  $0/88$  و  $0/84$  است. فاکتور پوشش بیشتر برای سامانه‌ها به



- [1] Sp-Europe., *Global Market Outlook for Solar Power 2015–2019*, European Photovoltaic Industry Association (EPIA), 2015.
- [2] Demiroren, A. and Yilmaz U., "Analysis of Change in Electric Energy Cost with Using Renewable Energy Sources in Gkceada, Turkey: An Island Example", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 1, pp. 323–333, 2010.
- [3] Hansen J.P., Narbel, P.A. and Aksnes, D.L., "Limits to Growth in the Renewable Energy Sector", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 70, No. November 2016, pp. 769–774, 2017.
- [4] Deline, C., Marion, B., Granata, J. and et al., "A Performance and Economic Analysis of Distributed Power Electronics in Photovoltaic Systems", *Energy*, Vol. 303, No. January, pp. 275–300, 2011.
- [5] Graff, K.M. and Eng, B., *Environmental Effects on the Operation of Triple-Junction Flexible Photovoltaic Panels*, 2014.
- [6] Edalati, S., Ameri, M., Iranmanesh, M. and et al., "Technical and Economic Assessments Of Grid-Connected Photovoltaic Power Plants: Iran Case Study", *Energy*, Vol. 114, pp. 923–934, 2016.
- [7] Shahnazari, M.R. and Lari, H.R., "Modeling of a Solar Power Plant in Iran", *Energy Strategy Reviews*, Vol. 18, pp. 24–37, Dec. 2017.
- [8] Najafi, G. and Khanali, M., "Feasibility and Analysis of Wind-Solar-Diesel Hybrid System for Damghan's Rural area (a Case Study)", *Energy Engineering & Management*, Vol. 9, No. 1, pp. 76–88, 2019.
- [9] Raufirad, M., *Design of Solar Systems in Buildings in Iran*. OECD Publishing, pp. 201–307, 2008.
- [10] Chopra, K.L., Paulson, P.D. and Dutta, V., "Thin-film Solar Cells: an Overview", *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, Vol. 12, No. 23, pp. 69–92, Mar. 2004.
- [11] Esmaili, M.S. and Najafi, G., "Energy-Economic Optimization of Thin Layer Photovoltaic on Domes and Cylindrical Towers", *International Journal of Smart Grid*, Vol. 3, No. 2, pp. 84–91, Jun. 2019.
- [12] Esmaili shayan, M., Najafi, G. and Banakar, A., "Power Quality in Flexible Photovoltaic System on Curved Surfaces," *Journal of Energy Planning And Policy Research*, Vol. 3, No. 17, pp. 105–136, 2017.
- [13] Shahraki, M., Fani, B. and Sadeghkhan, I., "Virtual Impedance-Based Adaptive Droop Control to Improve Reactive Power Sharing for Inverter-Based Microgrids", *Energy Engineering & Management*, Vol. 9, No. 1, pp. 26–35, 2019.
- [14] Sheikhi, A., Ranjbar, A.M. and Oraee, H., "Financial Analysis and Optimal Size and Operation for a Multicarrier Energy System", *Energy and Buildings*, Vol. 48, pp. 71–78, 2012.
- [15] Taghikhani, M.A. and Mandegar Nik, M., "Effect of Smart Homes in Management and Reduction of Electrical Energy Consumption", *Energy Engineering & Management*, Vol. 9, No. 2, pp. 0–0, 2019.
- [16] Zubi, G., Dufo-Lopez, R., Pasaoglu, G. and Pardo, N., "Techno-Economic Assessment of an Off-Grid PV System for Developing Regions To Provide Electricity For Basic Domestic Needs: A 2020-2040 Scenario", *Applied Energy*, Vol. 176, pp. 309–319, 2016.
- [17] Carpinelli, G., Rizzo, R., Caramia, P. and Varilone, P., "Taguchi's Method for Probabilistic Three-Phase Power Flow of Unbalanced Distribution Systems with Correlated Wind and Photovoltaic Generation Systems", *Renewable Energy*, Vol. 117, pp. 227–241, 2018.
- [18] Biyik, E., Araz, M., Hepbasli, A. and et al., "Engineering Science and Technology , an International Journal A key review of Building Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 14, pp. 13–43, 2017.
- [19] Bloem, J.J.J., Lodi, C., Cipriano, J. and Chemisana, D., "An Outdoor Test Reference Environment for Double Skin Applications of Building Integrated PhotoVoltaic Systems", *Energy and Buildings*, Vol. 50, pp. 63–73, Jul. 2012.
- [20] Tng, Tianjin Jinneng Solar Cell Co. Ltd, 2017. [Online]. Available: <http://www.globalsources.com/si/AS/Tianjin-Jinneng/6008815379287/Showroom/3000000149681/AL.L.htm>.
- [21] Tina, G.M. and Grasso, A.D., "Remote Monitoring System for Stand-Alone Photovoltaic Power Plants: The Case Study of a PV-Powered Outdoor Refrigerator", *Energy Conversion and Management*, Vol. 78, pp. 862–871, 2014.
- [22] Buker, M.S., Mempo, B. and Riffat, S.B., "Performance Evaluation and Techno-Economic Analysis of a Novel Building Integrated PV/T Roof Collector: An experimental Validation", *Energy and Building*, Vol. 76, pp. 164–175, 2014.
- [23] Azadbakht, M., Esmailzadeh, E. and Esmaili-Shayan, M., "Energy Consumption During Impact Cutting of Canola Stalk as a Function of Moisture Content and cutting Height", *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, Vol. 14, No. 2, pp. 147–152, Jun. 2015.
- [24] Baneshi, M. and Bahreini, S.A., "Impacts of Hot Water Consumption Pattern on optimum Sizing and Techno-

۷۷ آزمون فنی اقتصادی سامانه خورشیدی انعطاف پذیر با روش تاگوجی در کشور ایران

*Economic Aspects of residential Hybrid Solar Water Heating Systems*", Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 30, pp. 139–149, Dec. 2018.

[25] Touati, F., Al-Hitmi, M.A., Chowdhury, N.A. and et al.,

*"Investigation of Solar PV Performance Under Doha Weather Using a Customized Measurement and Monitoring System"*, Renewable Energy, Vol. 89, pp. 564–577, 2016.