نشریه علمی‌پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی
سال یازدهم، شمارهٔ اول/ بهار ۱۴۰۰/ صفحه ۶۲ـ۷۵

مدل‌سازی دینامیک سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه و ارزیابی فنی- اقتصادی آن‌ها تحت سناریوهای مختلف در بخش خانگی چند شهر بزرگ ایران

مهدی بانشی

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
mbaneshi@shirazu.ac.ir

چکیده: **پژوهش حاضر به مدل‌سازی و تحلیل فنی و اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک تولید پراکنده متصل به شبکه برای استفاده در بخش خانگی شهرهای اصفهان، بندرعباس، تبریز، تهران، شیراز و یزد می‌پردازد. مدل‌سازی به‌صورت دینامیک و با استفاده از داده‌های ساعتی هواشناسی و توزیع ساعتی تقاضای برق انجام شده است. اثر سیاست‌های قیمتی و مشوق‌های دولتی در اقتصاد سیستم‌های فتوولتائیک تحت شش سناریوی متفاوت بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد میزان برق تولیدی سیستم یک کیلوواتی با زوایای ثابت در محدودهٔ ۱۴۳۷ـ۱۵۳۶ کیلووات ساعت می‌باشد که با اعمال سیاست مترینگ خالص، فقط حدود ۴۴/۱ـ۴۹/۴٪ از آن به شبکه برق فروخته می‌شود. استفاده از سیستم‌های دارای ردیاب خورشیدی تک‌محورهٔ عمودی و دومحوره، میزان تولید و فروش برق را به‌ترتیب ۲۶/۸ـ۴۴/۴٪ و ۳۵/۶ـ۶۲/۸٪ افزایش می‌دهد. صرف خرید تضمینی برق مازاد با تعرفه‌های فعلی نمی‌تواند استفاده از این سیستم‌ها را توجیه‌پذیر کند اما در کنار این سیاست، با اعمال مشوق‌های دولتی در تأمین هزینه‌های اولیه و افزایش قیمت برق، دورهٔ بازگشت سرمایه را می‌توان در شهرهای مورد مطالعه به‌جز بندرعباس به حدود شش سال رساند. نتایج نشان می‌دهد که بایستی سیاست‌های تشویقی مناسب و مخصوص به هر منطقه با توجه به شرایط اقلیمی توسط دولت اعمال گردد.**

واژه‌های کلیدی: **سیستم فتوولتائیک، بخش خانگی، آنالیز فنی-اقتصادی، بازگشت سرمایه، سیاست‌های تشویقی.**

---

* نویسندهٔ مسئول

۱. مقدمه

انرژی الکتریسیته حائز سریع‌ترین نرخ رشد مصرف در بین انرژی‌های نهایی است. سهم سوخت‌های فسیلی در تولید الکتریسیته در جهان به حدود ۶۷٪ می‌رسد، درحالی‌که سهم منابع تجدیدپذیر غیر آبی (شامل زمین گرمایی، فتوولتائیک خورشیدی، حرارتی خورشیدی، باد و امواج) حدود ۳/۶٪ است [۱]. سهم سیستم‌های فتوولتائیک در تولید الکتریسیته در کشورهای پیشرفته طی سالیان اخیر به‌طور قابل توجهی افزایش داشته است. برای نمونه طی ده سال منتهی به ۲۰۱۳ میلادی، میزان تولید برق از سلول‌های خورشیدی در آلمان از ۳۱۳ گیگاوات ساعت (معادل ۰/۰۵٪) به ۳۱۰۱۰ گیگاوات ساعت (معادل ۴/۹٪) رسیده است [۱].

کشور ایران بیش از ۹۴٪ از برق مورد نیاز خود را از منابع فسیلی تأمین می‌کند و این در حالی است که متوسط رشد سالیانهٔ مصرف برق در ایران حدود ۵/۷٪ است که تقریباً دو برابر متوسط نرخ رشد دنیاست [۱]. افزایش روزافزون استفاده از منابع فسیلی برای تأمین مصارف داخلی، کشور را با مشکلات عدیدهٔ اقتصادی و محیط زیستی مواجه خواهد کرد. علاوه بر این، قرار گرفتن ایران بر روی کمربند خورشیدی و بهره بردن بیش از دوسوم پهنهٔ کشور از تابش خورشیدی روزانه حدود ۴/۵ـ۵/۵ کیلووات ساعت به‌ازای هر متر مربع ایدهٔ تأمین بخشی از برق مصرفی از سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی را تقویت می‌کند [۲]. به همین منظور بر اساس سند چشم‌انداز بیست‌سالهٔ توسعهٔ کشور مقرر شده است که تا پایان این برنامه، ۲۰۰۰ مگاوات برق از منابع تجدیدپذیر غیر آبی با سرمایه‌گذاری ۳ میلیارد دلاری دولتی و بخش خصوصی تولید گردد [۳].

بخش خانگی در ایران حدود ۳۱٪ برق تولیدی را مصرف می‌کند. این بخش یکی از پتانسیل‌های تولید برق تجدیدپذیر با استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک پراکنده است. دولت نیز مشوق‌هایی مانند خرید تضمینی برق مازاد در یک دورهٔ بلندمدت را ارائه می‌دهد. این پژوهش به دنبال تحلیل دقیق فنی و اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک در چندین کلان‌شهر ایران در مناطق مختلف اقلیمی و تعیین کارایی سیاست‌های حمایتی در این باره است.

پژوهش‌های زیادی در زمینهٔ طراحی، بهینه‌سازی و تحلیل‌های اقتصادی و محیط زیستی انواع سیستم‌های فتوولتائیک شامل سیستم‌های متصل به شبکه، مستقل از شبکه، سیستم‌های دارای زوایای ثابت و متغیر و سیستم‌های ترکیبی با سایر منابع تجدیدپذیر صورت گرفته است که در زیر به چند نمونه از آن‌ها اشاره می‌شود:

اوبی و باس [۴] مروری بر پیشرفت‌ها و چالش‌های سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه انجام دادند. کار کردن در نقطهٔ بیشینهٔ توان، استفاده از سیستم ردیاب خورشیدی و استفاده از اینورترهای بدون ترانسفورماتور به‌عنوان راهکارهایی برای رسیدن به بازده بالا در سیستم‌های فتوولتائیک پیشنهاد شده است. راچ و همکاران [۵] با توجه به کمبود فضاهای شهری و گران بودن آن برای نصب سیستم‌های فتوولتائیک به ارائهٔ مدل ریاضی جهت نصب بیشترین تعداد صفحات خورشیدی در یک فضای معین با در نظر گرفتن اثرات سایه پرداخته‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که با بهینه‌سازی پارامترهای نصب مثل زاویهٔ شیب، فاصلهٔ صفحات و ارتفاع نصب می‌توان توان خروجی را تا ۲۵٪ بهبود بخشید. ییلماز و همکاران [۶] به تأمین انرژی مورد نیاز یک مدرسه با استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک پرداختند. وی [۷] اثر سیستم‌های فتوولتائیک بر ارزش خانه‌ها در هاوایی را مورد مطالعه قرار داده است. لائو و همکاران [۸] اثر قیمت اجزای سیستم فتوولتائیک، تعرفهٔ برق و مالیات بر کربن را بر اقتصاد سیستم‌های فتوولتائیک در بخش خانگی کشور مالزی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه که دارای قیمتی کمتر از ۱۱۲۰ دلار برای هر کیلووات باشند، از نظر اقتصادی کاملاً اجرایی هستند. برای قیمت‌های تا ۲۳۲۰ دلار برای هر کیلووات نیاز است تا تعرفهٔ خرید برق مازاد از بخش خانگی به سه برابر قیمت فروش برق شبکه یعنی حدود ۰/۳ دلار بر کیلووات ساعت برسد. افزایش تعرفهٔ خرید برق مازاد به ۰/۵ دلار بر کیلووات ساعت و مالیات کربن حدود ۳۶ دلار برای هر تن، سیستم‌های فتوولتائیک با قیمت‌های بالا، حدود ۴۰۰۰ دلار برای هر کیلووات را نیز از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر می‌کند. ماندادا و همکاران [۹] به مطالعهٔ هزینهٔ همترازشدهٔ برق (LCOE[1]) یک سیستم هیبریدی شامل سیستم فتوولتائیک، باطری و CHP برای بخش خانگی پرداختند. آن‌ها پارامترهای مؤثر بر هزینهٔ همترازشده شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری و سوخت، وام بانکی و طول عمر پروژه را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که در برخی مناطق آمریکا استفاده از این سیستم هیبریدی از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر است. سسمرو و همکاران [۱۰] اثر سیاست‌های مختلف بر اقتصاد سیستم‌های فتوولتائیک در بخش خانگی منطقهٔ غرب آمریکا را تحلیل کردند. آن‌ها نشان دادند که سیاست‌های حمایتی بایستی تقویت شود. همچنین قیمت‌گذاری متفاوت برق در یک شبانه‌روز بر اساس ساعات اوج بار و ساعت کم‌باری در کنار سیاست مترینگ خالص[2] می‌تواند به بهبود اقتصاد سیستم‌های فتوولتائیک کمک نماید. لی و همکاران [۱۱] اثر

1. Levelized Cost of Energy
2. Net Metering Policy

مشوق‌های ایالتی بر بهبود اوضاع اقتصادی استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک خانگی در ایالات متحده را بررسی کردند. آن‌ها ۱۶ سناریو برای بهبود مشوق‌های دولتی را بررسی کرده و توانستند مشوق‌های مالی و مالیاتی مناسب‌تری را برای به صرفه کردن سیستم‌های فتوولتائیک در بخش خانگی ارائه کنند. بخشی و ساده [۱۲] یک آنالیز جامع اقتصادی برای تعیین بهترین ساختار آرایه‌های فتوولتائیک انجام دادند. آن‌ها ابتدا تولید برق سالیانه یک سیستم فتوولتائیک بدون ردیاب خورشیدی و با ردیاب تک‌محوره و دومحوره را محاسبه کرده و سپس به ارزیابی پارامترهای مهم اقتصادی مثل ارزش فعلی خالص، نرخ داخلی بازگشت سرمایه و دورهٔ بازگشت سرمایه برای هر سه ساختار پرداختند. در این تحقیق نشان داده شد که سیستم ردیاب تک‌محورهٔ عمودی بهترین انتخاب است. مهدوی عادلی و همکاران [۱۳] به ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی برق خورشیدی در مصارف خانگی پرداختند. آن‌ها به مطالعهٔ موردی یک ساختمان سه‌طبقهٔ مسکونی در شهر مشهد با متوسط مصرف ماهیانه ۴۰۰ کیلووات ساعت پرداخته و نشان دادند که دورهٔ بازگشت سرمایه برای یک سیستم ۴/۲ کیلوواتی برابر ۱۳ سال است.

تام وهمکاران [۱۴] به بررسی اقتصادی استفاده از سیستم‌های ۱/۵ تا ۵ کیلووات در بخش خانگی هشت شهر مهم استرالیا پرداخته و نشان دادند که هزینهٔ صرفه‌جویی‌شده در یک بازهٔ زمانی پانزده‌ساله از ۲۷۳ دلار (۰/۳۵٪) تا ۵۳۰۲۱ دلار (۱۲۳/۸٪) می‌تواند تغییر کند. ویرا و همکاران [۱۵] به‌منظور انطباق بیشتر بین تولید برق از یک سیستم فتوولتائیک و مصرف برق در بخش خانگی در یکی از شهرهای پرتغال به طراحی بهینهٔ ذخیره‌سازی با استفاده از باتری‌های لیتیومی پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که استفاده از ذخیره‌سازی موجب کاهش ۷۶ درصدی در برق منتقل‌شده به شبکه، ۷۸/۳ درصدی در برق خریداری‌شده از شبکه و ۸۷/۲ درصدی در هزینهٔ قبض برق شده است. نظر به کاهش هزینهٔ باتری‌های لیتیومی در ابعاد خانگی، ترو و همکاران [۱۶] به بررسی اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک خانگی دارای ذخیره‌سازی پرداختند. اثر قیمت تبادل برق با شبکه و مالیات سرمایه‌گذاری در تحلیل اقتصادی در ۵۰ ایالت آمریکا مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد در صورت طراحی اندازهٔ مناسب، یک سیستم فتوولتائیک-باتری می‌تواند از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه‌تر از یک سیستم سادهٔ فتوولتائیک باشد.

مدل‌سازی میزان برق تولیدی سیستم‌های فتوولتائیک در بخش خانگی مناطق گرمسیری توسط فیتریاتی و شن [۱۷] انجام شد. نتایج مدل‌سازی آن‌ها نشان داد استفاده از سه تکنولوژی مختلف پنل‌های خورشیدی می‌تواند ۱۷۲-۱۷۰۰٪ برق اضافی در مقایسه با مصرف خانوار تولید کند. سوو و همکاران [۱۸] به بررسی اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک خانگی در استان‌های مختلف کانادا و مقایسهٔ آن‌ها در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶ پرداختند. همچنین کوریا و همکاران [۱۹] به بررسی اقتصادی پروژه‌های فتوولتائیک در بخش خانگی کشور آرژانتین و بررسی اثر سیاست‌های این کشور در تولید انرژی تجدیدپذیر در بخش خانگی پرداختند. فیکرو [۲۰] به بررسی اقتصادی صرفه‌جویی در قبوض برق بخش خانگی در اثر استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک در کشور آمریکا پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد که میزان صرفه‌جویی واقعی، حدود ۲۰٪ بیشتر میزان پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌هاست.

اثر زاویهٔ شیب و سمت و بازده پنل‌های خورشیدی در میزان برق تولیدی برای یک ساختمان انرژی صفر در اقلیم‌های مختلف آب‌وهوایی در کشور چین توسط لیو و همکاران [۲۱] بررسی و نشان داده شد منطقهٔ جنوب غربی چین محل مناسبی برای استقرار ساختمان‌های انرژی صفر است. ارزیابی جزئی و دقیق از میزان برق تولیدی سیستم‌های فتوولتائیک خانگی برای ۱۵۰ ساختمان مسکونی در سه نقطهٔ مختلف شهر لاگوس نیجریه توسط اینونجن و همکاران [۲۲] صورت گرفت. هزینهٔ همترازشدهٔ برق تولیدی و میزان کاهش در تولید دی‌اکسید کربن به‌ترتیب برابر ۰/۳۹۰-۰/۷۴۳ دلار بر کیلووات ساعت و ۷۴۵۶/۴-۳۱/۲۴ کیلوگرم در سال تخمین زده شد. همچنین، بررسی فنی و اقتصادی سه سیستم فتوولتائیک کوچک در شهرهای مختلف کشور پرو و اثر سیاست‌ها و مشوق‌های دولتی توسط اسپینوزا و همکاران [۲۳] صورت پذیرفت. قیمت همترازشدهٔ برق ۱/۱-۰/۲ دلار بر کیلووات ساعت به دست آمد و نشان داده شد فقط در برخی نقاط این قیمت در مقایسه با تعرفهٔ خرید برق از شبکه از نظر اقتصادی به صرفه است.

در تازه‌ترین پژوهش‌ها، مانگیانت و همکاران [۲۴] به مطالعهٔ فنی-اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک در بخش خانگی شهر براونزویل ایالت تگزاس آمریکا با در نظر گرفتن پروفایل متوسط تقاضای برق خانوار پرداختند. نتایج نشان داد که معادل ۱۱٪ برق تولیدی توسط نیروگاه‌های محلی می‌تواند توسط سیستم‌های فتوولتائیک در ساختمان‌ها با نرخ بازگشت سرمایه ۲/۹٪ و دورهٔ بازگشت سرمایه ۱۵ سال تولید شود. پژوهش انجام‌شده توسط مارتینوپولوس [۲۵] بر روی یک سیستم فتوولتائیک خانگی ۴ کیلوواتی در سراسر اروپا نشان داد که مقدار انرژی به‌دست‌آمده به مقدار انرژی سرمایه‌گذاری‌شده بسته به محل نصب در محدودهٔ ۱/۶۴-۵ تغییر می‌کند. همچنین دورهٔ بازگشت سرمایه در اغلب مناطق بین ۵ تا ۱۱ سال به دست آمد. یک

مدل تحلیل اقتصادی وابسته به محل برای بررسی اثر تعرفه‌های خرید تضمینی برق توسط لن و همکاران [۲۶] ارائه شد. این مطالعه بر اساس داده‌های ۱۷۷ ساختمان در بازهٔ زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۸ در کوئینزلند جنوبی در کشور استرالیا انجام شد. نتایج بررسی نشان داد که گسترش نصب سیستم‌های فتوولتائیک خانگی به‌شدت با تغییر در تعرفه‌های تضمینی خرید برق مرتبط است.

در پژوهش حاضر، یک سیستم فتوولتائیک متصل به شبکهٔ برق با ظرفیت نامی یک کیلووات با و بدون رديابِ خورشیدی در نظر گرفته شده است. میزان ساعتی برق تولیدی از این سیستم در طول سال در چندین کلان‌شهر ایران از اقلیم‌های مختلف آب‌وهوایی با استفاده از داده‌های ساعتی هواشناسی محاسبه شده است. با توجه به سیاست مترینگ خالص در تبادل برق با شبکه نیاز است تا پروفایل ساعتی مصرف برق خانوار در هریک از شهرهای مورد بررسی در طول یک سال تخمین زده شود. با توجه به میزان برق تولیدی سیستم و برق مصرفی خانوار، میزان فروش برق به شبکه محاسبه شده و درآمد ناشی از آن برآورد می‌شود. سپس آنالیز اقتصادی برای برآورد قیمت همترازشدهٔ برق، ارزش فعلی خالص پروژه، نرخ داخلی بازگشت سرمایه و دورهٔ بازگشت سرمایه با در نظر گرفتن تفاوت تعرفه‌های برق در مناطق مختلف آب‌وهوایی و در طول شبانه‌روز بر اساس ساعات کم‌باری، میان‌باری و اوج بار انجام گرفته و شش سناریوی مختلف برای ارزیابی مشوق‌های دولتی در توجیه‌پذیری استفاده از این سیستم‌ها در بخش خانگی مورد مطالعه قرار گرفته است.

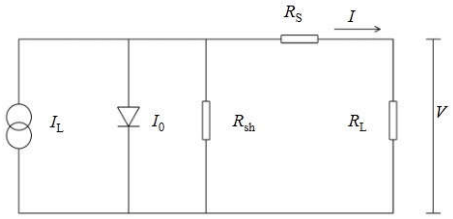
۲. مدل‌سازی فنی و اقتصادی

۱.۲. محاسبهٔ توان خروجی سیستم فتوولتائیک

برای محاسبهٔ میزان توان DC یک ماژول مدل‌های مختلفی ارائه شده که یکی از معروف‌ترین آن‌ها مدل تک دیوده-پنج پارامتری می‌باشد که طرح‌وارهٔ آن در شکل (۱) نشان داده شده است. مقدار جریان ماژول در دما و شدت تابش ثابت از رابطهٔ زیر به دست می‌آید [۲۷]:

$$I = I_L - I_0\left[\exp\frac{V+IR_s}{a}-1\right]-\frac{V+IR_s}{R_{sh}} \qquad (۱)$$

پارامترهای I_L، I_o، R_s، R_{sh} و a به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ جریان سلول، جریان دیود، مقاومت سری، مقاوت شانت و پارامتر تجربی هستند که بایستی مشخص شوند. برای به دست آوردن این پارامترها داشتن پنج معادله که ارتباط بین V و I در چند نقطه را مشخص می‌کنند، الزامی است. این معادلات بر اساس اطلاعات ارائه‌شده توسط کارخانه‌های ساخت سلول‌های خورشیدی در حالت‌های:



شکل (۱): مدار تک‌دیوده معادل یک ماژول PV [۲۸]

(۲) مدار باز:
$$I = 0, V = V_{oc,ref}$$

(۳) اتصال کوتاه:
$$\begin{cases} I = I_{sc,ref}, V = 0 \\ \dfrac{dI}{dV} = -\dfrac{1}{R_{sh,ref}} \end{cases}$$

(۴) بیشینهٔ توان:
$$I = I_{mp,ref}, V = V_{mp,ref}, \frac{dI}{dV} = 0$$

در دمای مرجع (T_{ref}) برابر با ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد و تابش مرجع (G_{ref}) برابر با ۱۰۰۰ وات بر متر مربع تولید می‌شوند. حل این دستگاه معادلات، مقادیر پارامترهای مجهول را در شرایط مرجع به دست می‌دهد. در سایر شرایط دمایی و تابشی مقادیر پارامترها از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۲۷]:

$$I_L = \frac{G}{1000} I_{L,ref} + \mu_{I,SC}\left(T_c - 298.15\right) \qquad (۵)$$

$$I_o = I_{o,ref}\left(\frac{T_c}{298.15}\right)^3 \exp\left[\frac{1}{k}\left(\frac{1.12}{T_{ref}} - \frac{E_{bg}}{T_c}\right)\right] \qquad (۶)$$

$$a = a_{ref}\frac{T_c}{T_{ref}} \qquad (۷)$$

$$R_{sh} = R_{sh,ref}\frac{1000}{G} \qquad (۸)$$

که در آن $\mu_{I,SC}$، k و E_{bg} برابر ضریب دمای جریان، ثابت بولتزمن انرژی طیف حفره نیمه‌رساناست. T_c دمای سلول است که با استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$T_c = T_a + G/800\left(T_{NOCT} - 20\right)\left(1-\eta_{ref}/\tau\alpha\right) \times 9.5/\left(5.7+3.8v_{w,adj}\right) \qquad (۹)$$

در این رابطه، T_{NOCT} دمای سلول در حالت بی‌باری و تحت تابش ۸۰۰ وات بر متر مربع، دمای محیط ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد و سرعت وزش باد ۱ متر بر ثانیه است. همچنین

$$\eta_{ref} = \frac{I_{mp}V_{mp}}{1000A_m} \qquad (۱۰)$$

$$v_{w.adj} = \begin{cases} 0.51v_w & \text{یک طبقه و کمتر} \\ 0.61v_w & \text{دو طبقه و بیشتر} \end{cases} \qquad (۱۱)$$

در این روابط، v_w سرعت باد، η_{ref} بازده در حالت مرجع و A_m مساحت سطح ماژول هستند. برای یک سیستم شامل فقط یک زیر آرایه میزان ولتاژ در هر رشته برابر است با [۲۷]:

$$V_{dc} = V_{dc,m} N_{modules} \quad (۱۲)$$

که در آن، $V_{dc,m}$ ولتاژ مستقیم هر ماژول و $N_{modules}$ تعداد ماژول‌ها در هر رشته است. همچنین برای این سیستم میزان توان ناخالص خروجی برابر است با:

$$P_{dc,gross} = N_{modules} N_{parstring} P_{dc,m} F_{dc,ss} \quad (۱۳)$$

که در آن، $N_{parstring}$ تعداد رشته‌های موازی، $P_{dc,m}$ توان هر ماژول و $F_{dc,SS}$ ضریب اتلاف ناشی از سایهٔ خود ماژول‌هاست. با در نظر گرفتن سایر اتلاف‌ها مانند افت ولتاژ در دایودها و سایر اتصال‌های الکتریکی، اتلاف مقاومتی در سیم‌کشی‌ها و... می‌توان توان DC خالص خروجی ($P_{dc,net}$) را محاسبه کرد. توان AC خالص خروجی از سیستم برابر است با:

$$P_{ac,net} = \eta_{inv} F_{ac} P_{dc,net} \quad (۱۴)$$

که در آن، η_{ref} بازده اینورتر و F_{ac} نشان‌دهندهٔ میزان اتلاف در قسمت AC سیستم مثل اتلاف مقاومتی در سیم‌کشی‌های بین اینورتر و نقطهٔ اتصال به شبکه است. برای حل معادله‌ها و مدل‌سازی سیستم فتوولتائیک در این پژوهش از نرم‌افزار SAM[1] [۲۹] استفاده شده است.

۲.۲. محاسبهٔ میزان تابش خورشید

میزان تابش مستقیم و پخشی خورشید برحسب W/m^2 از مدل دانشیار [۳۰] و به‌ترتیب از روابط (۱۵) و (۱۶) محاسبه می‌شوند:

$$I_b = 950\left(1-CF\right)\left\{1-exp\left[-0.075\left(90-\theta_z\right)\right]\right\} \quad (۱۵)$$

$$I_d = 1.432 + 2.107\left(90-\theta_z\right)) + 121.3CF \quad (۱۶)$$

در این دو رابطه، CF ضریب ابرناکی است که برای شهرهای مختلف ایران از مرجع [۳۰] استخراج شده است. θ_z نیز زاویهٔ سمت‌الرأس خورشید است که برابر است با:

$$\theta_z = cos^{-1}(\sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\ \cos\omega) \quad (۱۷)$$

که در آن φ عرض جغرافیایی محل، ω زاویهٔ ساعت و δ زاویهٔ میل خورشید می‌باشد که از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$\delta = 23.45\sin\left[\left(184+n\right)/365\times360\right] \quad (۱۸)$$

n شمارهٔ روز در سال میلادی است. زاویهٔ ساعت در هنگام ظهر شرعی (ساعت ۱۲ خورشیدی) برابر صفر است. قبل از ظهر به‌ازای هر یک ساعت، ۱۵ درجه کاهش و بعد از ظهر به‌ازای هریک ساعت ۱۵ درجه افزایش می‌یابد. میزان کل تابش خورشیدی بر روی یک سطح افقی برابر است با:

$$GHI = I_b\cos\theta_z + I_d \quad (۱۹)$$

۳.۲. آنالیز اقتصادی

برای محاسبهٔ ارزش فعلی خالص (NPV)[2] یک پروژه بایستی جریان هزینه‌ها و درآمدهای سالیانهٔ یک پروژه که در طول عمر پروژه واقع می‌شوند، به معادل ارزش فعلی آن‌ها تبدیل کرده و سپس با جمع زدن آن‌ها به‌صورت جبری، به ارزش فعلی خالص پروژه دست یافت. این کار را با استفاده از رابطهٔ ریاضی (۲۰) می‌توان انجام داد [۳۱]:

$$NPV = \sum_{t=1}^{N} \frac{R_t - C_t}{\left(1+i_f\right)^t} - I_0 \quad (۲۰)$$

که در آن، R_t و C_t درآمدها و هزینه‌ها در سال t، I_0 سرمایه‌گذاری اولیه، N طول عمر پروژه و i_f نرخ تنزیل ظاهری می‌باشد که برابر است با:

$$i_f = i + f + if \quad (۲۱)$$

که در آن، i نرخ تنزیل واقعی و f نرخ تورم می‌باشد. دورهٔ بازگشت سرمایه[3] ($N_{payback}$) برابر طول مدت‌زمانی است که هزینه‌های انجام‌شده برگشت داده می‌شود و با شمردن تعداد سال‌هایی که طول می‌کشد تا ارزش فعلی خالص برابر صفر گردد محاسبه می‌شود، یعنی:

$$\sum_{t=1}^{N_{payback}} \frac{R_t - C_t}{\left(1+i_f\right)^t} = I_0 \quad (۲۲)$$

نرخ داخلی بازگشت سرمایه (IRR)[4] برابر نرخ تنزیلی است که با آن، میزان ارزش فعلی خالص با در نظر گرفتن طول عمر پروژه برابر صفر گردد، یعنی:

$$\sum_{t=1}^{N} \frac{R_t - C_t}{\left(1+IRR\right)^t} = I_0 \quad (۲۳)$$

برای محاسبهٔ هزینهٔ همترازشدهٔ الکتریسیته (LCOE) بایستی هزینه‌های پروژه را به‌صورت سالیانه برآورد کرد و با تقسیم آن بر کل برق تولیدی سیستم برحسب کیلووات ساعت به هزینهٔ همترازشدهٔ الکتریسیته دست یافت. هزینه‌ها شامل هزینهٔ سرمایهٔ سالانه (ACC) و هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌باشد که برای تمام سیستم‌ها معادل ۱٪ هزینهٔ سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شده است. هزینهٔ سرمایهٔ سالانه از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

1. System Advisor Model

2. Net Present Value
3. Payback Period
4. Internal Rate of Return

$$ACC = \frac{i_f \left(1+i_f\right)^N}{\left(1+i_f\right)^N - 1} I_0 \qquad (۲۴)$$

۴.۲. سایر اطلاعات مورد نیاز مدل‌سازی

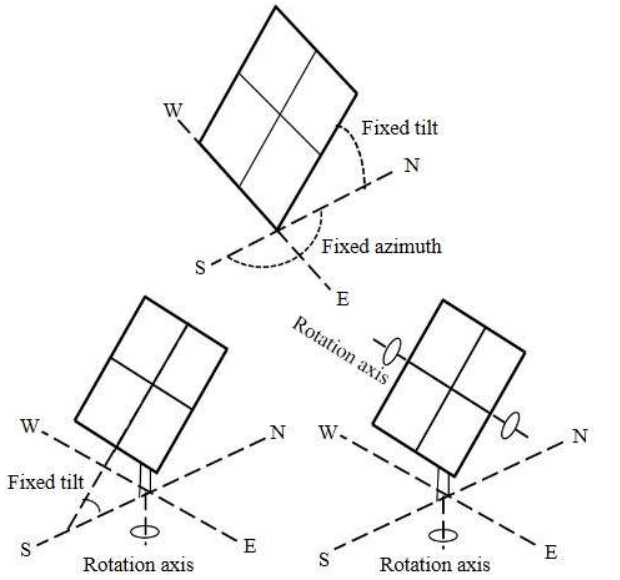
این پژوهش، سیستم‌های فتوولتائیک یک کیلوواتی متصل به شبکه در شش شهر بزرگ ایران شامل اصفهان، بندرعباس، تبریز، تهران، شیراز و یزد را مورد مطالعه قرار می‌دهد.

مشخصات ماژول مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است. زوایای شیب و سمت صفحات خورشیدی می‌توانند ثابت و یا متغیر باشند. در این پژوهش علاوه بر زوایای ثابت، اثر سیستم ردیاب خورشیدی تک‌محوره و دومحوره بر عملکرد سیستم فتوولتائیک نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. همان طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، سیستم‌های ردیاب تک‌محوره فقط زاویهٔ سمت (شرق به غرب) و سیستم‌های دومحوره هر دو زاویهٔ سمت و شیب صفحات خورشیدی را تغییر می‌دهند.

برای یک سیستم یک کیلوواتی تعداد چهار ماژول مورد نیاز است که این ماژول‌ها به‌صورت سری در یک رشتهٔ چهارتایی به هم متصل شده‌اند. زاویهٔ شیب ماژول‌ها در حالت ثابت برابر با عرض جغرافیایی محل و زاویهٔ سمت در حالت ثابت رو به جنوب انتخاب شده است. اینورتر مورد استفاده از نوع Growatt 1000TL با بیشینهٔ توان AC خروجی ۱۱۰۰ وات است.

جدول (۱): مشخصات ماژول PV [۳۲]

مشخصه	نوع/ اندازه
نوع ماژول	Yingli Energy YL250P-32b
مساحت (m^2)	۱/۷۷۴
بازده اسمی (٪)	۱۴/۰۹
توان بیشینه (W_{dc})	۲۵۰
ولتاژ در بیشینهٔ توان (V_{dc})	۳۲/۳
جریان در بیشینهٔ توان (A_{dc})	۷/۷
ولتاژ مدار باز (V_{dc})	۴۰/۹
جریان اتصال کوتاه (A_{dc})	۸/۳
ضریب دمایی توان بیشینه (%/°C)	-۰/۴۶۸
ضریب دمایی ولتاژ مدار باز (%/°C)	-۰/۳۳۹
ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه (%/°C)	۰/۰۴



شکل (۲): صفحهٔ خورشیدی با زوایای ثابت، با سیستم ردیاب خورشیدی تک‌محوره و با سیستم ردیاب خورشیدی دومحوره [۲۷]

نرخ افت خروجی سالیانه ماژول‌ها[1] ۰/۵٪ در نظر گرفته شده است. همچنین حدود ۴/۵٪ تلفات DC شامل اتلاف ناشی از عدم تطابق شرایط کارکرد ماژول‌ها[2] (۲٪)، اتلاف در دیودها و اتصالات (۰/۵٪) و اتلاف در سیم‌کشی‌ها (۲٪) و حدود ۱٪ تلفات AC در سیم‌کشی‌ها از خروجی اینورتر در محاسبات لحاظ شده است. میانگین سالیانهٔ افت ناشی از گردوغبار[3] بر روی تابش خورشیدی وارده بر ماژول‌های فتوولتائیک ۵٪ در نظر گرفته شده است. تلفات ناشی از سایه‌اندازی ماژول‌ها بر روی یکدیگر با فرض وجود فاصلهٔ کافی بین آن‌ها در محاسبات وارد نشده است.

داده‌های هواشناسی ساعتی مورد نیاز شامل میزان تابش خورشید، دمای محیط و سرعت باد می‌باشند. میزان تابش خورشید از دو نوع مستقیم و پخشی با استفاده از معادلات بخش ۲-۲ محاسبه شده‌اند. دمای محیط و سرعت باد نیز از مرجع [۳۳] برای شهرهای مورد نظر استخراج شده‌اند. متوسط سالیانهٔ داده‌های مورد استفاده برای هر شش شهر مورد مطالعه در جدول (۲) نشان داده شده است. شکل (۳) پروفایل ساعتی داده‌های هواشناسی شهر شیراز را به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد. ارزیابی اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک بر اساس تعرفه‌های خرید برق از شبکه بر طبق جدول (۳) صورت گرفته است. همچنین به‌منظور تشویق مشترکین برای مدیریت مصرف در اوج بار مبلغ ۵۲/۴ تومان به‌ازای هر کیلووات ساعت مصرف در اوج بار به قبوض برق

1. Degradation Rate
2. Module Mismatch
3. Soiling Loss

اضافه شده و مبلغ ۲۶/۲ تومان به‌ازای هر کیلووات ساعت مصرف در کم‌باری از قبوض برق کاسته می‌شود. در بندرعباس در ۹ ماهۀ اول سال این اعداد در ضریب یک‌سوم ضرب می‌شوند.

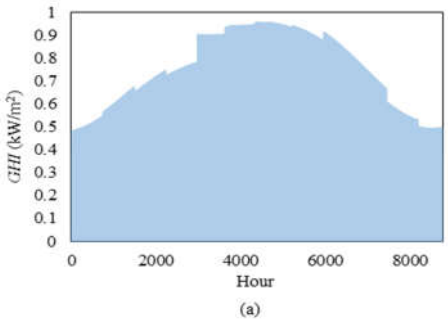
ساعات اوج بار و کم باری در فصول بهار و تابستان در بازۀ ۱۹ـ۲۳ و ۷ـ۲۳ و در فصول پاییز و زمستان در بازۀ ۱۷ــ۲۱ و ۵ــ۲۱ قرار دارند. قیمت خرید برق مازاد از مشترکین خانگی طبق مصوبۀ دولت ۱۰۴۰ تومان به‌ازای هر کیلووات ساعت است که پس از ۱۰ سال این عدد در ضریب ۰/۷ ضرب می‌شود [۳۵].

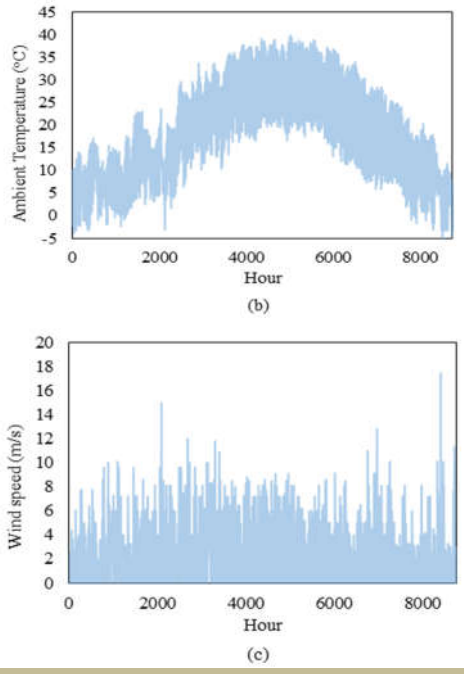
نرخ تورم، نرخ تنزیل اسمی و طول عمر پروژه برابر ۱۰٪، ۱۸٪ و ۲۰ سال است. در طول عمر پروژه، ماژول‌های فتوولتائیک نیازی به تعویض ندارند اما اینورتر با فرض عمر مفید ۱۰ سال نیاز به یک بار تعویض دارد.

هزینۀ یک سیستم یک کیلووات متصل به شبکۀ سراسری برق با ماژول‌های انتخابی و سازۀ ثابت، ۹ میلیون تومان تخمین زده شده است که از این مقدار ۴۶٪ هزینۀ ماژول‌های فتوولتائیک، ۲۱٪ هزینۀ اینورتر، ۱۰٪ هزینۀ نصب و ۸/۵٪ هزینۀ سازۀ ثابت قرارگیری صفحات خورشیدی است. هزینۀ سازه با سیستم ردیاب خورشیدی تک‌محوره و دومحوره به‌ترتیب حدود ۵ برابر و ۸/۵ برابر سازه‌ای ثابت است [۱۲]. بر این اساس، قیمت سیستم تک‌محوره و دومحوره به‌ترتیب معادل ۱۲/۰۶ و ۱۴/۷۴ میلیون تومان است.

جدول (۲): میانگین داده‌های هواشناسی شهرهای مختلف

شهر	تشعشع روزانه ($kWh/m^2/day$)	دمای هوا (°C)	سرعت باد (m/s)
اصفهان	۵/۴	۱۶/۳	۲
بندرعباس	۵/۵	۲۶/۸	۲/۸
تبریز	۴/۷	۱۲	۳
تهران	۵	۱۷/۳	۲/۷
شیراز	۵/۶	۱۷/۹	۲/۲
یزد	۵/۳	۱۹/۲	۲/۴





شکل (۳): پروفایل ساعتی داده‌های هواشناسی شهر شیراز شامل (الف) میزان تابش، (ب) دمای محیط [۳۳] و (ج) سرعت باد [۳۳]

مقدار متوسط سالیانۀ مصرف برق به‌ازای هر مشترک در بخش خانگی شهرهای مورد نظر بر اساس آمار تفصیلی صنعت برق در سال ۹۴ [۳۶] در جدول (۴) آورده شده است. از میان مکان‌های مورد مطالعه، تبریز با مصرف متوسط ۲۰۲۵ کیلووات ساعت کمترین مقدار و بندرعباس با ۱۱۱۰۰ کیلووات ساعت بیشترین مقدار مصرف را دارند. شکل (۴) توزیع ساعتی و توزیع ماهانۀ تقاضای برق را برای یک واحد مسکونی تک‌خانوار در شهر شیراز نشان می‌دهد. برای سایر شهرها نیز توزیع ساعتی مصرف برق بر اساس متوسط مصرف سالیانه برآورد و در محاسبات استفاده شده است.

جدول (۳): تعرفه‌های برق بخش خانگی [۳۴]

اصفهان، تبریز، تهران، شیراز و یزد در همۀ فصول سال و بندرعباس در فصل زمستان

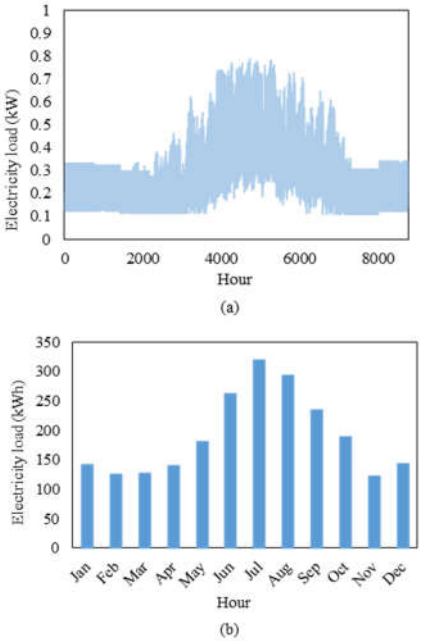
پله‌های مصرف ماهیانه (kWh)	۰-۱۰۰	۱۰۱-۲۰۰	۲۰۱-۳۰۰	۳۰۱-۴۰۰	۴۰۱-۵۰۰	۵۰۱-۶۰۰	>۶۰۰
قیمت (تومان)	۵۲/۴	۶۱/۱	۱۳۱	۲۳۵/۷	۲۷۰/۸	۳۴۰/۷	۳۷۵/۲

بندرعباس در فصول بهار، تابستان و پاییز

پله‌های مصرف ماهیانه (kWh)	۰-۱۰۰	۱۰۱-۲۰۰	۲۰۱-۳۰۰	۳۰۱-۴۰۰	۴۰۱-۵۰۰	۵۰۱-۶۰۰	>۶۰۰
قیمت (تومان)	۱۷/۵	۱۹/۴	۲۱	۸۲/۳	۱۵۷/۳	۲۰۰/۹	۲۳۵/۷

جدول (۴): متوسط سالیانهٔ مصرف برق خانوار در شهرهای مختلف

شهر	متوسط مصرف
اصفهان	۲۲۰۰
بندرعباس	۱۱۱۰۰
تبریز	۲۰۲۵
تهران	۲۴۲۵
شیراز	۲۲۸۰
یزد	۲۱۵۰



شکل (۴): تقاضای (الف) ساعتی و (ب) ماهیانهٔ برق یک واحد مسکونی تک‌خانوار در شیراز

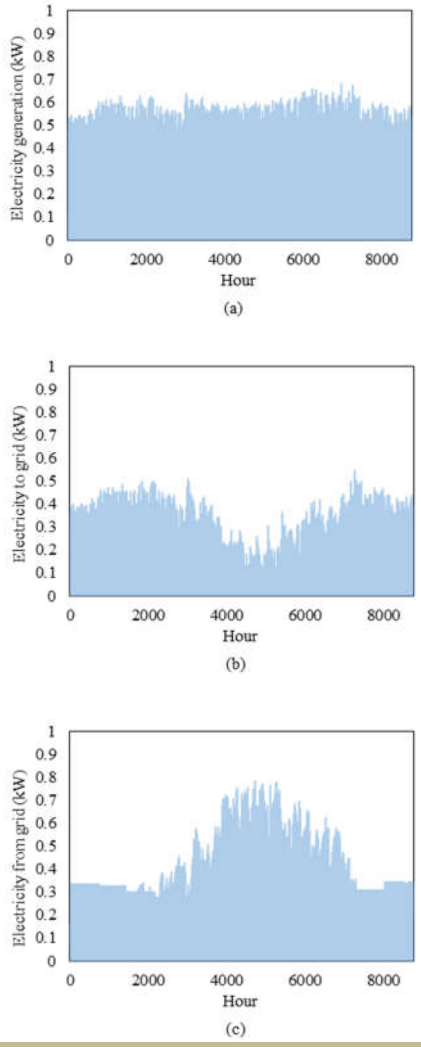
۳. بحث در نتایج

۱.۳. ارزیابی فنی

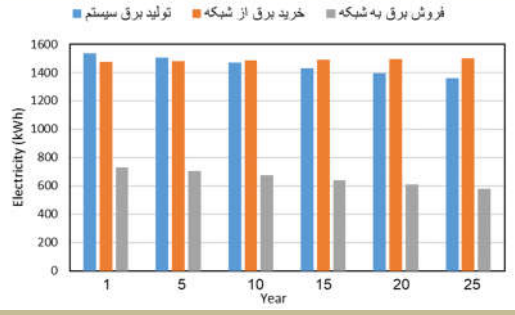
شکل (۵) توزیع ساعتی برق تولیدی از سیستم فتوولتائیک یک کیلوواتی ثابت در شهر شیراز، برق فروخته‌شده به شبکه و برق خریداری‌شده از شبکه را نشان می‌دهد. بیشینه توان تولید شده حدود ۰/۷۸ کیلووات و کل برق تولیدی سالیانه ۱۵۳۶ کیلووات ساعت است. از این میزان برق تولیدی، ۷۳۱ کیلووات ساعت برق مازاد به شبکهٔ برق فروخته شده و مابقی آن مصرف می‌گردد. بیشینهٔ توان فروخته‌شده به شبکه حدود ۰/۵۵ کیلووات است. ضریب ظرفیت سیستم در شیراز برابر است با ۱۷/۵٪ که از تقسیم برق تولیدی سیستم بر ۸۷۶۰ کیلوات ساعت به دست می‌آید.

افت خروجی سالیانهٔ ماژول‌ها که معادل نیم درصد در نظر گرفته شده است، باعث می‌شود که میزان تولید، خرید و فروش برق در طول عمر پروژه تغییر کند. این تغییرات برای سیستم ثابت نصب‌شده در شهر شیراز در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. مقایسهٔ بین آخرین سال عمر پروژه با اولین سال آن در شهر شیراز نشان می‌دهد که تولید برق ۱۱٪ کاهش، خرید برق از شبکه ۱/۷٪ افزایش و فروش برق به شبکه ۲۰٪ کاهش یافته‌اند.

نتایج سالیانهٔ به‌دست‌آمده در سایر شهرهای مورد مطالعه در جدول (۵) و (۶) نشان داده شده‌اند. نتایج ارائه‌شده مربوط به اولین سال کارکرد سیستم هستند و به‌دلیل در نظر گرفتن نرخ افت خروجی سالیانهٔ سیستم، این اعداد برای سال‌های بعد متفاوت‌اند.



شکل (۵): توزیع ساعتی (الف) تولید برق، (ب) برق فروخته‌شده به شبکه و (ج) برق خریداری‌شده از شبکه در شهر شیراز



شکل (۶): تغییرات تولید، خرید و فروش برق سیستم ثابت نصب‌شده در شهر شیراز در طول عمر پروژه

جدول (۵): مقایسهٔ نتایج سیستم فتوولتائیک با زوایای ثابت در شهرهای مختلف

شهر	مصرف برق (kWh)	تولید برق سیستم (kWh)	خرید برق از شبکه (kWh)	فروش برق به شبکه (kWh)	ضریب ظرفیت (٪)
اصفهان	۲۲۰۰	۱۵۴۳	۱۴۱۹	۷۶۲	۱۷/۶
بندرعباس	۱۱۱۰۰	۱۵۰۶	۹۵۹۴	۰	۱۷/۲
تبریز	۲۰۲۵	۱۴۳۷	۱۲۸۴	۶۹۶	۱۶/۴
تهران	۲۴۲۵	۱۴۹۷	۱۵۸۸	۶۶۰	۱۷/۱
شیراز	۲۲۸۰	۱۵۳۶	۱۴۷۵	۷۳۱	۱۷/۵
یزد	۲۱۵۰	۱۴۸۲	۱۳۹۲	۷۲۳	۱۶/۹

جدول (۶): اثر سیستم ردیاب خورشیدی بر کارکرد سیستم فتوولتائیک

شهر	تولید برق (kWh)	فروش برق (kWh)	ضریب ظرفیت (٪)	تولید برق (kWh)	فروش برق (kWh)	ضریب ظرفیت (٪)
	تک‌محوره			دومحوره		
اصفهان	۲۰۰۳	۱۰۴۴	۲۲/۹	۲۲۱۰	۱۲۱۱	۲۵/۲
بندرعباس	۱۹۱۰	۰	۲۱/۸	۲۱۶۸	۰	۲۴/۷
تبریز	۱۹۲۳	۱۰۱۰	۲۱/۹	۲۰۷۰	۱۱۳۳	۲۳/۶
تهران	۱۹۷۱	۹۲۴	۲۲/۵	۲۱۴۷	۱۰۶۱	۲۴/۵
شیراز	۱۹۷۶	۹۹۱	۲۲/۶	۲۲۱۸	۱۱۷۹	۲۵/۳
یزد	۱۹۱۹	۹۸۷	۲۱/۹	۲۱۲۴	۱۱۴۹	۲۴/۲

کمترین میزان برق فروخته‌شده به شبکه برابر صفر کیلووات ساعت مربوط به شهر بندرعباس به‌دلیل تقاضای بالای برق در بخش خانگی این شهر با توجه به اقلیم آب‌وهوایی است. برق فروخته‌شده به شبکه در شهرهای اصفهان، تبریز، تهران، شیراز و یزد به‌ترتیب برابر ۴۹/۴٪، ۴۸/۴٪، ۴۴/۱٪، ۴۷/۶٪ و ۴۸/۸٪ برق تولیدی سیستم فتوولتائیک است. ضریب ظرفیت از ۱۶/۴ تا ۱۷/۶٪ تغییر می‌کند که کمترین ضریب ظرفیت مربوط به شهر تبریز با توجه به میزان کم تابش خورشیدی است.

اثر سیستم ردیاب خورشیدی تک‌محوره و دومحوره بر عملکرد سیستم فتوولتائیک در جدول (۶) نشان داده شده است. همان طور که قبلاً توضیح داده شد، سیستم‌های ردیاب تک‌محوره زاویهٔ سمت و سیستم‌های دومحوره هر دو زاویهٔ سمت و شیب صفحات خورشیدی را تنظیم می‌کنند. میزان افزایش تولید برق سیستم با استفاده از سیستم ردیاب خورشیدی تک‌محوره ۲۶/۸ـ۳۳/۸٪ و با استفاده از سیستم دومحوره ۴۳/۲ـ۴۴/۴٪ خواهد بود. همچنین میزان افزایش در فروش برق به شبکه، با نادیده گرفتن داده‌های شهر بندرعباس، برابر ۳۵/۶ـ۴۵/۱٪ در سیستم ردیاب تک‌محوره و ۵۸/۹ـ۶۲/۸٪ در سیستم ردیاب دومحوره است. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از سیستم ردیاب خورشیدی، درصد افزایش فروش برق به شبکه بیش از درصد افزایش در برق تولیدی است.

۲.۳. ارزیابی اقتصادی

جدول (۷) قیمت همترازشدهٔ واقعی برق تولیدی از سیستم فتوولتائیک با زوایای ثابت، ردیاب تک‌محوره و ردیاب دومحوره را نشان می‌دهد. هزینهٔ همترازشدهٔ واقعی برق به‌ترتیب برابر ۵۱۳ـ۵۵۲، ۵۲۹ـ۵۵۷ و ۵۸۶ـ۶۲۸ تومان به‌ازای هر کیلووات ساعت در سیستم‌های ثابت، تک‌محوره و دومحوره است.

جدول (۸) هزینهٔ سالیانهٔ قبوض برق را در حالت‌های بدون سیستم فتوولتائیک و با سیستم فتوولتائیک برای شهرهای مختلف مقایسه می‌کند. مقادیر منفی نشان‌دهندهٔ بستانکار شدن مشترک برق خانگی است. همان طور که انتظار می‌رود کمترین هزینهٔ برق در حالت بدون سیستم فتوولتائیک مربوط به شهر تبریز با مقدار ۱۶۶۴۰۰ تومان و بیشترین مقدار مربوط به بندرعباس با ۶۶۵۷۰۰ تومان است که با استفاده از سیستم فتوولتائیک می‌تواند تا ۴۵۳۰۰۰ تومان کاهش یابد. به‌جز شهر بندرعباس، در سایر شهرها استفاده از سیستم فتوولتائیک حتی با اعمال سیاست مترینگ خالص موجب بستانکار شدن مشترک برق خانگی می‌شود که این میزان برای سیستم‌های ثابت، تک‌محوره و دومحوره برابر با ۶۲۳۶۰۰ـ۷۵۶۵۰۰، ۹۳۹۸۰۰ـ۱۰۸۹۵۰۰ و ۱۰۹۹۵۰۰ـ۱۲۸۳۵۰۰ تومان خواهد شد. بنابراین میزان کلی نفعی که مشترک برق خانگی از نصب سیستم فتوولتائیک می‌برد، برابر با هزینهٔ قبض برق بدون سیستم فتوولتائیک (که دیگر نیازی به پرداخت آن نیست) به علاوه درآمد خالص حاصل از تبادل برق با شبکه است. برای نمونه میزان نفع مشترک برق با نصب سیستم فتوولتائیک ثابت در شهر شیراز برابر با ۹۱۳۹۰۰=۷۱۵۲۰۰+۱۹۸۷۰۰ تومان و در بندرعباس برابر ۱۶۰۹۰۰=۵۰۴۸۰۰−۶۶۵۷۰ تومان است.

جدول (۷): مقایسهٔ هزینهٔ همترازشدهٔ واقعی تولید برق از سیستم فتوولتائیک برای شهرهای مختلف

شهر	هزینه همتراز شده واقعی تولید برق (Toman/kWh)		
	ثابت	تک‌محوره	دومحوره
اصفهان	۵۱۳	۵۲۹	۵۸۶
بندرعباس	۵۲۷	۵۵۷	۵۹۹
تبریز	۵۵۲	۵۵۳	۶۲۸
تهران	۵۳۰	۵۳۹	۶۰۵
شیراز	۵۱۶	۵۳۸	۵۸۶
یزد	۵۳۵	۵۵۴	۶۱۲

جدول (۸): مقایسهٔ هزینهٔ سالیانهٔ قبوض برق در شهرهای مختلف (تومان)

شهر	بدون سیستم فتوولتائیک	با سیستم فتوولتائیک		
		ثابت	تک‌محوره	دومحوره
اصفهان	۱۸۷۹۰۰	−۷۵۶۵۰۰	−۱۰۸۹۵۰۰	−۱۲۸۳۵۰۰
بندرعباس	۶۶۵۷۰۰	۵۰۴۸۰۰	۴۷۹۳۰۰	۴۵۳۰۰۰
تبریز	۱۶۶۴۰۰	−۶۹۲۴۰۰	−۱۰۶۱۰۰۰	−۱۲۰۳۶۰۰
تهران	۲۱۹۶۰۰	−۶۲۳۶۰۰	−۹۳۹۸۰۰	−۱۰۹۹۵۰۰
شیراز	۱۹۸۷۰۰	−۷۱۵۲۰۰	−۱۰۲۳۸۰۰	−۱۲۴۲۷۰۰
یزد	۱۸۱۲۰۰	−۷۱۴۴۰۰	−۱۰۲۶۱۰۰	−۱۲۱۴۴۰۰

ارزیابی اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک بر اساس شش سناریوی مختلف صورت گرفته است که در جدول (۹) به‌صورت خلاصه نشان داده شده‌اند. در سناریوی اول، قیمت خرید برق از شبکه و فروش برق به شبکه طبق تعرفه (جدول ۴) در نظر گرفته شده‌اند و دولت هیچ مشوقی در تأمین هزینهٔ سرمایه‌گذاری سیستم فتوولتائیک ندارد. در سناریوی دوم با همان قیمت‌های خرید و فروش برق، معادل ۵۰٪ از هزینهٔ سرمایه‌گذاری به‌صورت وام با نرخ بهره معادل نرخ تورم تأمین می‌شود. در سناریوی سوم با همان قیمت‌های خرید و فروش برق، معادل ۵۰٪ از هزینهٔ سرمایه‌گذاری به‌صورت بلاعوض توسط دولت تأمین می‌شود. سناریوهای چهارم تا ششم شبیه سناریوهای اول تا سوم هستند با این تفاوت که قیمت خرید برق از شبکه توسط مشترکین خانگی طبق تعرفهٔ آزاد یعنی قیمت آخرین پلهٔ مصرف در جدول (۳) می‌باشد که برای شهرهای اصفهان، تبریز، تهران، شیراز و یزد در همهٔ فصول سال و بندرعباس در فصل زمستان برابر ۳۷۵/۲ تومان بر کیلووات ساعت و برای بندرعباس در فصول بهار، تابستان و پاییز برابر ۲۳۵/۷ تومان بر کیلووات ساعت است.

جدول (۹): سناریوهای شش‌گانهٔ ارزیابی اقتصادی

	قیمت خرید برق از شبکه	قیمت فروش برق به شبکه	وام کم‌بهره	کمک بلاعوض
سناریوی اول	طبق تعرفه (جدول ۳)	طبق تعرفه	×	×
سناریوی دوم	طبق تعرفه (جدول ۳)	طبق تعرفه	معادل ۵۰٪ هزینهٔ اولیه	×
سناریوی سوم	طبق تعرفه (جدول ۳)	طبق تعرفه	×	معادل ۵۰٪ هزینهٔ اولیه
سناریوی چهارم	طبق تعرفهٔ آزاد	طبق تعرفه	×	×
سناریوی پنجم	طبق تعرفهٔ آزاد	طبق تعرفه	معادل ۵۰٪ هزینهٔ اولیه	×
سناریوی ششم	طبق تعرفهٔ آزاد	طبق تعرفه	×	معادل ۵۰٪ هزینهٔ اولیه

جدول (۱۰): ارزش فعلی خالص سرمایه‌گذاری (میلیون تومان)

سناریو	اصفهان			بندرعباس		
	a	b	c	a	b	c
۱	−۰/۸	−۱/۰	−۲/۰	−۷/۴	−۱۰/۲	−۱۲/۶
۲	۱/۰	۱/۴	۰/۹	−۵/۶	−۷/۸	−۹/۷
۳	۳/۷	۵/۰	۵/۴	−۲/۹	−۴/۲	−۵/۳
۴	۱/۷	۲/۲	۱/۴	−۴/۶	−۶/۵	−۸/۴
۵	۳/۵	۴/۶	۴/۳	−۱/۷	−۳/۳	−۴/۶
۶	۶/۲	۸/۲	۸/۷	−۰/۱	−۰/۵	−۱/۱
سناریو	تبریز			تهران		
	a	b	c	a	b	c
۱	−۱/۶	−۱/۵	−۲/۹	−۱/۷	−۲/۰	−۳/۳
۲	۰/۲	۰/۹	۰/۰	۰/۱	۰/۴	−۰/۴
۳	۲/۹	۴/۶	۴/۵	۲/۸	۴/۰	۴/۱
۴	۰/۹	۱/۷	۰/۳	۰/۹	۱/۳	۰/۲
۵	۲/۷	۴/۱	۳/۳	۲/۷	۳/۷	۳/۱
۶	۵/۴	۷/۷	۷/۷	۵/۴	۷/۴	۷/۶
سناریو	شیراز			یزد		
	a	b	c	a	b	c
۱	−۱/۱	−۱/۵	−۲/۳	−۱/۲	−۱/۶	−۲/۷
۲	۰/۷	۰/۹	۰/۷	۰/۵	۰/۸	۰/۳
۳	۳/۴	۴/۶	۵/۱	۳/۳	۴/۴	۴/۷
۴	۱/۵	۱/۸	۱/۲	۱/۳	۱/۵	۰/۶
۵	۳/۳	۴/۲	۴/۱	۳/۱	۳/۹	۳/۶
۶	۶/۰	۷/۸	۸/۶	۵/۸	۷/۶	۸/۰

a: سیستم ثابت b: با سیستم ردیاب تک‌محوره

c: با سیستم ردیاب دومحوره

نتایج برآورد ارزش فعلی خالص و توجیه‌پذیری استفاده از سه نوع سیستم فتوولتائیک در شهرهای مختلف تحت سناریوهای متفاوت به‌ترتیب در جداول (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده‌اند. همچنین نتایج محاسبهٔ نرخ داخلی بازگشت سرمایه و دورهٔ بازگشت سرمایه در جداول (۱۲) و (۱۳) قابل مشاهده‌اند. نتایج ارزیابی اقتصادی برای شهرهای مختلف به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

- تحت سناریوی اول، صرفاً با اعمال سیاست خرید تضمینی برق مازاد بدون هیچ نوع مشوقی در تأمین هزینهٔ اولیهٔ سیستم، هیچ کدام از سیستم‌ها در هیچ‌یک از شهرهای مورد بررسی توجیه اقتصادی ندارند.
- در شهر بندرعباس تحت هیچ کدام از سناریوهای شش‌گانه، استفاده از سیستم فتوولتائیک توجیه اقتصادی پیدا نمی‌کند.
- در سناریوی دوم، با اعمال ۵۰٪ وام کم‌بهره، نصب هر سه نوع سیستم در شهرهای اصفهان، تبریز، شیراز و یزد و نصب سیستم ثابت و تک‌محوره در شهر تهران توجیه اقتصادی پیدا می‌کند.
- در سناریوی دوم، اقتصادی‌ترین انتخاب برای همهٔ شهرها به‌جز بندرعباس، سیستم با ردیاب تک‌محوره است.

- در سناریوی دوم، اقتصادی‌ترین انتخاب برای همهٔ شهرها به‌جز بندرعباس، سیستم با ردیاب تک‌محوره است
- در سناریوی سوم، با اعمال ۵۰٪ کمک بلاعوض دولتی، نصب هر سه نوع سیستم در شهرهای اصفهان، تبریز، تهران، شیراز و یزد توجیه اقتصادی پیدا می‌کند. در این پنج شهر به‌جز تبریز، استفاده از سیستم با ردیاب دومحوره بهترین انتخاب است. در شهر تبریز همچنان استفاده از سیستم با ردیاب تک‌محوره توصیه می‌شود.
- در سناریوی چهارم با تعرفهٔ آزاد قیمت برق، نصب هر سه نوع سیستم در همهٔ شهرها به‌جز بندرعباس از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر می‌شود. بهترین انتخاب در این پنج شهر، سیستم با ردیاب تک‌محوره است.
- در سناریوی پنجم، با تعرفهٔ آزاد قیمت برق و ۵۰٪ وام کم‌بهره، سیستم با ردیاب تک‌محوره در شهرهای اصفهان، تبریز، تهران، شیراز و یزد بهترین انتخاب است.
- در سناریوی ششم، با تعرفهٔ آزاد قیمت برق و ۵۰٪ کمک بلاعوض، سیستم با ردیاب دومحوره در شهرهای اصفهان، تهران، شیراز و یزد و سیستم با ردیاب تک‌محوره در تبریز بهترین انتخاب‌ها از نظر اقتصادی هستند.
- برای همهٔ شهرهای مورد مطالعه به‌جز بندرعباس، اقتصادی‌ترین سرمایه‌گذاری در سیستم‌های فتوولتائیک به‌ترتیب تحت سناریوهای ششم و سوم صورت می‌گیرد. برای شهر بندرعباس، سناریوهای ششم و پنجم دارای اولویت هستند.

جدول (۱۱): توجیه‌پذیری اقتصادی نصب سیستم‌های فتوولتائیک تحت سناریوهای شش‌گانه

	اصفهان			بندرعباس			تبریز		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
سناریوی اول	×	×	×	×	×	×	×	×	×
سناریوی دوم	○	○̲	○	×	×	×	○	○̲	○
سناریوی سوم	○	○	○̲	×	×	×	○	○̲	○
سناریوی چهارم	○	○̲	○	×	×	×	○	○̲	×
سناریوی پنجم	○	○̲	○	×	×	×	○	○̲	○
سناریوی ششم	○	○	○̲	×	×	×	○	○̲	○
	تهران			شیراز			یزد		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
سناریوی اول	×	×	×	×	×	×	×	×	×
سناریوی دوم	○	○̲	×	○	○̲	○	○	○̲	○
سناریوی سوم	○	○	○̲	○	○	○̲	○	○	○̲
سناریوی چهارم	○	○̲	○	○	○̲	○	○	○	○̲
سناریوی پنجم	○	○̲	○	○	○̲	○	○	○	○̲
سناریوی ششم	○	○	○̲	○	○	○̲	○	○	○̲

a: سیستم ثابت b: با سیستم ردیاب تک‌محوره c: با سیستم ردیاب دومحوره
× توجیه‌ناپذیر ○ توجیه‌پذیر ○̲ بهترین انتخاب

جدول (۱۲): نرخ داخلی بازگشت سرمایه‌گذاری در سیستم‌های فتوولتائیک تحت سناریوهای شش‌گانه (٪)

سناریو	اصفهان			بندرعباس		
	a	b	c	a	b	c
۱	۱۶/۷	۱۶/۸	۱۶/۰	۳/۰	۲/۱	۱/۶
۲	۲۰/۶	۲۰/۸	۱۹/۵	-۱/۸	-۳/۹	-۵/۰
۳	۲۸/۷	۲۸/۹	۲۷/۶	۷/۹	۶/۸	۶/۲
۴	۲۰/۶	۲۰/۵	۱۹/۳	۱۰/۵	۹/۹	۹/۳
۵	۲۶/۸	۲۶/۶	۲۴/۶	۱۳/۸	۱۱/۸	۱۰/۸
۶	۳۵/۰	۳۴/۸	۳۲/۷	۱۷/۸	۱۷/۰	۱۶/۱
	تبریز			تهران		
	a	b	c	a	b	c
۱	۱۵/۴	۱۶/۳	۱۵/۱	۱۵/۲	۱۵/۵	۱۴/۷
۲	۱۸/۶	۱۹/۹	۱۸/۱	۱۸/۳	۱۸/۷	۱۷/۴
۳	۲۶/۶	۲۹/۰	۲۶/۱	۲۶/۳	۲۶/۸	۲۵/۳
۴	۱۹/۴	۱۹/۹	۱۸/۳	۱۹/۴	۱۹/۵	۱۸/۲
۵	۲۴/۸	۲۵/۷	۲۳/۱	۲۴/۸	۲۵/۰	۲۲/۸
۶	۳۲/۹	۳۳/۸	۳۱/۱	۳۲/۸	۳۳/۱	۳۰/۸
	شیراز			یزد		
	a	b	c	a	b	c
۱	۱۶/۳	۱۶/۲	۱۵/۸	۱۶/۰	۱۶/۱	۱۵/۴
۲	۱۹/۹	۱۹/۹	۱۹/۱	۱۹/۵	۱۹/۶	۱۸/۵
۳	۲۸/۰	۲۷/۹	۲۷/۲	۲۷/۵	۲۷/۷	۲۶/۵
۴	۲۰/۳	۲۰/۰	۱۹/۱	۱۹/۹	۱۹/۷	۱۸/۶
۵	۲۶/۳	۲۵/۸	۲۴/۴	۲۵/۶	۲۵/۴	۲۳/۵
۶	۳۴/۴	۳۳/۹	۳۲/۴	۳۳/۸	۳۳/۵	۳۱/۶

a : سیستم ثابت b: با سیستم ردیاب تک‌محوره c: با سیستم ردیاب دومحوره

- تحت همه سناریوهای مورد مطالعه، شهر اصفهان توجیه‌پذیرترین سرمایه‌گذاری در سیستم‌های فتوولتائیک را دارا می‌باشد. شیراز در سناریوهای سوم تا ششم و تبریز در سناریوی دوم در مرتبه بعد قرار دارند.
- نرخ داخلی بازگشت سرمایه برای شهرهای اصفهان، تبریز، تهران، شیراز و یزد به‌ترتیب در محدوده ۱۶–۳۵، ۱۵–۳۳، ۱۵–۳۳، ۱۶–۳۴ و ۱۵–۳۳ درصد می‌باشد. پروژه‌هایی با نرخ داخلی بازگشت سرمایه بزرگتر از نرخ تنزیل ظاهری از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر هستند.
- در میان سرمایه‌گذاری‌هایی که از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر هستند، کوتاهترین دوره بازگشت سرمایه مربوط به سناریوی ششم می‌باشد که حدود ۵ تا ۶ سال برای شهرهای مورد مطالعه به‌جز بندرعباس می‌باشد. سناریوهای سوم و پنجم در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

جدول (۱۳): دورهٔ بازگشت سرمایه‌گذاری در سیستم‌های فتوولتائیک تحت سناریوهای شش‌گانه (سال)

سناریو	اصفهان			بندرعباس		
	a	B	c	a	b	c
۱	×	×	×	×	×	×
۲	۱۵/۹	۱۵/۴	۱۸/۷	×	×	×
۳	۷/۰	۷/۰	۷/۵	×	×	×
۴	۱۵/۳	۱۵/۶	۱۹/۰	×	×	×
۵	۸/۶	۸/۷	۱۰/۰	×	×	×
۶	۵/۲	۵/۲	۵/۸	×	×	×
سناریو	تبریز			تهران		
	a	B	c	a	b	c
۱	×	×	×	×	×	×
۲	۲۲/۲	۱۷/۶	۲۴/۶	۲۳/۶	۲۱/۵	×
۳	۸/۰	۷/۳	۸/۳	۸/۲	۷/۹	۸/۸
۴	۱۸/۶	۱۷/۱	۲۳/۲	۱۸/۶	۱۸/۲	۲۳/۹
۵	۹/۹	۹/۲۳	۱۱/۸	۹/۹	۹/۸	۱۲/۲
۶	۵/۷	۵/۵	۶/۳	۵/۸	۵/۷	۶/۴
سناریو	شیراز			یزد		
	a	B	c	a	b	c
۱	×	×	×	×	×	×
۲	۱۷/۷	۱۷/۸	۲۰/۱	۱۸/۹	۱۸/۶	۲۲/۷
۳	۷/۴	۷/۴	۷/۷	۷/۶	۷/۵	۸/۱
۴	۱۶/۱	۱۶/۸	۱۹/۶	۱۷/۱	۱۷/۶	۲۱/۷
۵	۸/۹	۹/۲	۱۰/۳	۹/۳	۹/۵	۱۱/۲
۶	۵/۳	۵/۵	۵/۹	۵/۵	۵/۶	۶/۱

a: سیستم ثابت b: با سیستم ردیاب تک‌محوره c: با سیستم ردیاب دومحوره

۴. جمع‌بندی

این پژوهش به ارزیابی فنی و اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک یک کیلوواتی در بخش خانگی چند شهر مختلف ایران پرداخته است. یک آنالیز ساعتی در بازهٔ زمانی بیست‌ساله بر روی سیستم‌های فتوولتائیک با زوایای ثابت، ردیاب خورشیدی تک‌محوره و دومحوره انجام شد. تفاوت مصرف برق در بخش خانگی شهرهای مختلف در انجام محاسبات مورد توجه قرار گرفته و سناریوهای مختلفی به‌لحاظ اقتصادی مورد ارزیابی واقع شدند. نتایج نشان داد:

- با توجه به توزیع ساعتی در نظر گرفته‌شده برای تقاضای مصرف برق در یک واحد مسکونی و تحت سیاست مترینگ خالص، به‌جز در شهر بندرعباس حدود ۴۴/۱ــ۴۹/۴٪ برق تولیدی سیستم فتوولتائیک می‌تواند به شبکهٔ برق فروخته شود؛ که این میزان به ۳۵/۶ـ۴۵/۱٪ با سیستم ردیاب خورشید تک‌محوره و ۵۸/۹ــ۶۲/۸٪ با سیستم ردیاب خورشید دومحوره می‌رسد.
- عدم اعمال مشوق‌های دولتی در کنار تعرفهٔ یارانه‌ای برق خانگی، سرمایه‌گذاری در سیستم‌های فتوولتائیک خانگی را از نظر اقتصادی توجیه‌ناپذیر می‌کند.
- افزایش قیمت برق در کنار کمک بلاعوض در تأمین ۵۰ درصدی هزینهٔ اولیه، دورهٔ بازگشت سرمایه‌گذاری را به‌شدت کاهش داده و به ۵ تا ۶ سال می‌رساند.
- مناسب است که مشوق‌های دولتی با توجه به اقلیم آب‌وهوایی، پتانسیل طبیعی و متوسط میزان مصرف خانوارها در اقلیم‌های مختلف، مناسب‌سازی شوند.

مراجع

[1] International Energy Agancy, World: Electricity and Heat for 2014, www.iea.org/statistics/

[۲] سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)، http://www.satba.gov.ir/br/sun/potential

[۳] سند چشم‌انداز جمهوری اسلامی ایران در افق ۱۴۰۴، https://rc.majlis.ir/fa/law/show/132295

[4] Obi, M. and Bass, R., "*Trends and Challenges of Grid-Connected Photovoltaic Systems–A Review*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 58, pp. 1082-1094, 2016.

[5] Rachchh, R., Kumar, M. and Tripathi, B., "*Solar Photovoltaic System Design Optimization by Shading Analysis to Maximize Energy Generation from Limited Urban Area*", Energy Conversion and Management, Vol. 115, pp. 244-252, 2016.

[6] Yilmaz, S., Binici, H. and Ozcalik, H. R., "*Energy Supply in a Green School via a Photovoltaic-Thermal Power System*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 57, pp. 713-720, 2016.

[7] Wee, S., "*The Effect of Residential Solar Photovoltaic Systems on Home Value: A Case Study of Hawai'I*", Renewable Energy, Vol. 91, pp.282-292, 2016.

[8] Lau, K. Y., Muhamad, N. A., Arief, Y. Z., Tan, C. W. and Yatim, A. H. M., "*Grid-Connected Photovoltaic Systems for Malaysian Residential Sector: Effects of Component Costs, Feed-In Tariffs, And Carbon Taxes*", Energy, Vol. 102, pp.

65-82, 2016.

[9] Mundada, A. S., Shah, K. K. and Pearce, J. M., "*Levelized Cost of Electricity for Solar Photovoltaic, Battery and Cogen Hybrid Systems*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 57, pp. 692-703, 2016.

[10] Sesmero, J., Jung, J. and Tyner, W., "*The Effect of Current and Prospective Policies on Photovoltaic System Economics: An Application to the US Midwest*", Energy Policy, Vol. 93, pp. 80-95, 2016.

[11] Lee, M., Hong, T. and Koo, C., "*An Economic Impact Analysis of State Solar Incentives for Improving Financial Performance of Residential Solar Photovoltaic Systems in the United States*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 58, pp. 590-607, 2016.

[12] Bakhshi, R. and Sadeh, J., "*A Comprehensive Economic Analysis Method for Selecting the PV Array Structure in Grid–Connected Photovoltaic Systems*", Renewable Energy, Vol. 94, pp. 524-536, 2016.

[۱۳] مهدوی عادلی، محمدحسین، سلیمی‌فر، مصطفی، قزلباش، اعظم، «**ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی برق خورشیدی (فتوولتائیک) و برق فسیلی در مصارف خانگی (مطالعهٔ موردی مجتمع سه‌واحدی در شهرستان مشهد)**»، مجله علمی‌پژوهشی سیاستگذاری اقتصادی، شمارهٔ ۱۱، صفحات ۱۲۳_۱۴۷، ۱۳۹۳.

[14] Tam, V.W., Le, K.N., Zeng, S.X., Wang, X. and Illankoon, I.C.S., "*Regenerative Practice of Using Photovoltaic Solar Systems for Residential Dwellings: An Empirical Study in Australia*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 75, pp.1-10, 2017.

[15] Vieira, F.M., Moura, P.S. and de Almeida, A.T., "*Energy Storage System for Self-Consumption of Photovoltaic Energy in Residential Zero Energy Buildings*", Renewable Energy, Vol. 103, pp.308-320, 2017.

[16] Tervo, E., Agbim, K., DeAngelis, F., Hernandez, J., Kim, H.K. and Odukomaiya, A., "*An Economic Analysis of Residential Photovoltaic Systems with Lithium Ion Battery Storage in the United States*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 94, pp.1057-1066, 2018.

[17] Fitriaty, P. and Shen, Z., "*Predicting Energy Generation from Residential Building Attached Photovoltaic Cells in a Tropical Area Using 3D Modeling Analysis*", Journal of Cleaner Production, Vol. 195, pp.1422-1436, 2018.

[18] Sow, A., Mehrtash, M., Rousse, D.R. and Haillot, D., "*Economic Analysis of Residential Solar Photovoltaic Electricity Production in Canada*", Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 33, pp.83-94, 2019.

[19] Coria, G., Penizzotto, F. and Pringles, R., "*Economic Analysis of Photovoltaic Projects: The Argentinian Renewable Generation Policy for Residential Sectors*", Renewable Energy, Vol. 133, pp.1167-1177, 2019.

[20] Fikru, M.G., "*Estimated Electricity Bill Savings for Residential Solar Photovoltaic System Owners: Are They Accurate Enough?*", Applied Energy, Vol. 253, p.113501, 2019.

[21] Liu, C., Xu, W., Li, A., Sun, D. and Huo, H., "*Energy Balance Evaluation and Optimization of Photovoltaic Systems for Zero Energy Residential Buildings in Different Climate Zones of China*", Journal of Cleaner Production, Vol. 235, pp.1202-1215, 2019.

[22] Enongene, K.E., Abanda, F.H., Otene, I.J.J., Obi, S.I. and Okafor, C., "*The Potential of Solar Photovoltaic Systems for Residential Homes in Lagos City of Nigeria*", Journal of environmental management, Vol. 244, pp. 247-256, 2019.

[23] Espinoza, R., Muñoz-Cerón, E., Aguilera, J. and de la Casa, J., "*Feasibility Evaluation of Residential Photovoltaic Self-Consumption Projects in Peru*", Renewable energy, Vol. 136, pp.414-427, 2019.

[24] Mangiante, M.J., Whung, P.Y., Zhou, L., Porter, R., Cepada, A., Campirano Jr, E., Licon Jr, D., Lawrence, R. and Torres, M., "*Economic and Technical Assessment of Rooftop Solar Photovoltaic Potential in Brownsville, Texas, USA*", Computers, Environment and Urban Systems, Vol. 80, p.101450, 2020.

[25] Martinopoulos, G., "*Are Rooftop Photovoltaic Systems a Sustainable Solution for Europe? A Life Cycle Impact Assessment and Cost Analysis*", Applied Energy, Vol. 257, p.114035, 2020.

[26] Lan, H., Cheng, B., Gou, Z. and Yu, R., "*An Evaluation of Feed-In Tariffs for Promoting Household Solar Energy Adoption in Southeast Queensland, Australia*", Sustainable Cities and Society, Vol. 53, p.101942, 2020.

[27] Gilman, P., "*SAM Photovoltaic Model Technical Reference*", National Renewable Energy Laboratory, pp. 1-63, 2015.

[28] Brano, V.L., Orioli, A., Ciulla, G. and Di Gangi, A., "*An Improved Five-Parameter Model for Photovoltaic Modules*", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 94, No. 8, pp. 1358-1370, 2010.

[29] National Renewable Energy Laboratory, *System Advisor Model Version 2015.6.30 (SAM 2015.6.30)*, https://sam.nrel.gov/

[30] Daneshyar, M., "*Solar Radiation Statistics for Iran*", Solar Energy, Vol. 21, pp. 345-349, 1978.

[31] Bhattacharyya, S. C., Energy Economics: Concepts, Issues, Markets and Governance, London, Springer Science & Business Media, 2011.

[32] YL250P-29b Datasheet, www.yinglisolar.com

[33] Weather Data by Region, https://energyplus.net/weatherregion/asia_wmo_region_2/IRN%20%20

[۳۴] دفتر سرمایه‌گذاری و تنظیم مقررات، **تعرفه‌های برق و شرایط عمومی آن‌ها**، وزارت نیرو، تهران، ۱۳۹۸.

[۳۵] سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا)، **تعرفهٔ خرید تضمینی برق از نیروگاه‌های تجدیدپذیر و پاک**، وزارت نیرو، ۱۳۹۸.

[۳۶] شرکت توانیر، **آمار تفصیلی صنعت برق ایران ویژهٔ توزیع نیروی برق در سال ۱۳۹۴**، وزارت نیرو، ۱۳۹۵.