

## بررسی اثر روش‌های تعرفه‌بندی ثابت و پلکانی برق بر توجیه‌پذیری اقتصادی سیستم‌های برق خورشیدی خانگی

حسین یوسفی<sup>۱</sup>، دانشیار؛ محمدحسن قدوسی‌نژاد<sup>۲</sup>، کارشناس ارشد؛ یونس نوراللهی<sup>۳</sup>، دانشیار

۱- دانشکده علوم و فنون نوین - دانشگاه تهران - تهران - ایران - Hosseinyousefi@ut.ac.ir

۲- دانشکده علوم و فنون نوین - دانشگاه تهران - تهران - ایران - mh.ghodusi@ut.ac.ir

۳- دانشکده علوم و فنون نوین - دانشگاه تهران - تهران - ایران - noorollahi@ut.ac.ir

**چکیده:** تولید پراکنده برق در واحدهای مسکونی توسط سیستم‌های برق خورشیدی، راه‌حلی مناسب برای کاهش بار شبکه و گسترش استفاده از منابع تجدیدپذیر می‌باشد. چالش بزرگ برای ترغیب مصرف‌کنندگان برق برای استفاده از این سیستم‌ها، ایجاد جذابیت مالی و توجیه‌پذیری اقتصادی آن، می‌باشد. در این مقاله تحلیل فنی و اقتصادی سیستم برق خورشیدی خانگی همراه با دو روش تعرفه‌بندی برق شبکه، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌است. بدین منظور از نرم افزار SAM برای مدل‌سازی و آنالیز فنی و اقتصادی بهره برده شده است. نتایج نشان‌گر این واقعیت می‌باشند که در مجموع، در قیمت‌گذاری پلکانی نسبت به ثابت، بازدهی اقتصادی پروژه بهتر بوده و ارزش خالص فعلی و دوره بازگشت سرمایه مقادیر مطلوب‌تری دارند. به طوری که ارزش خالص فعلی در حالت پلکانی ۳۷۰۹ دلار بوده در حالی که در حالت ثابت ۲۴۶۸ دلار به دست آمده است. همچنین دوره بازگشت سرمایه در حالت پلکانی و ثابت به ترتیب ۵/۲ و ۶/۵ سال محاسبه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** تعرفه‌بندی ثابت و پلکانی، سیستم سلول خورشیدی، تحلیل اقتصادی، نرم‌افزار SAM.

## Analysis of the Effects of Flat and Tiered Pricing Methods on the Economic Feasibility of Residential Photovoltaic Systems

Hossein Yousefi<sup>1</sup>, Associate Professor; Mohammad Hasan Ghodusinejad<sup>2</sup>, MSc; Younes Noorollahi<sup>3</sup>, Associate Professor

1- Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: Hosseinyousefi@ut.ac.ir

2- Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: mh.ghodusi@ut.ac.ir

3- Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran, Email: noorollahi@ut.ac.ir

**Abstract:** Distributed generation by PV systems in residential buildings, is a suitable approach to reduce the peak load of the grid and extending the use of renewable energies. A big challenge in persuading the consumers to use such solar systems, is to create economic feasibility. In this paper, techno-economic feasibility study of a residential PV system with two pricing methods is presented. SAM software is used to model the system. The results showed that the tiered pricing method has a better economic efficiency than flat pricing method; where the net present value and payback time have relative better values. The net present value and payback time in tiered pricing are 3709\$ and 5.2 years, while in flat pricing method, these values are calculated as 2468\$ and 6.5 years.

**Keywords:** Flat and tiered pricing, PV system, economic analysis, SAM software.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۰۴، ۱۳۹۶/۰۴/۲۵ و ۱۳۹۶/۰۵/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۲۸

نام نویسنده مسئول: حسین یوسفی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - خیابان کارگر شمالی - بعد از تقاطع خیابان جلال آل احمد - جنب پردیس فنی - دانشکده علوم و فنون نوین

## ۱- مقدمه

قیمت‌گذاری مناسب خرید برق تجدیدپذیر و جذابیت اقتصادی می‌تواند مصرف‌کنندگان برق را به استفاده از سیستم‌های تولید پراکنده راغب نماید. قیمت پایین برق و عدم خرید مازاد تولید برق و یا خرید با قیمت پایین آن، از دلایل کندی رشد استفاده از برق تجدیدپذیر بوده است. در سال‌های گذشته مزیت نسبی کشور در استخراج و تولید نفت و فرآورده‌های آن باعث اختصاص دادن یارانه در جهت کمک مالی به مردم و تولیدکنندگان برای استفاده از انرژی بوده است. این امر باعث شده تا هزینه خرید و بهره‌برداری از سیستم انرژی‌های نوین و تجدیدپذیر از مرز اقتصادی، فاصله زیادی پیدا نماید. به دلیل عدم توجه اقتصادی طرح‌های انرژی‌های پاک برای مصرف‌کننده‌ها، فرهنگ‌سازی نیز نتوانسته سرعت استفاده از این انرژی‌ها را افزایش دهد. با توجه به هزینه‌ی بالای تولید برق برای دولت و هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای افزایش سالانه ظرفیت نیروگاه‌ها، طرح امکان فروش برق به شبکه توسط تولیدکنندگان خانگی و کوچک در دولت تصویب شده است. مزایای این طرح به صورت دوطرفه بوده و باعث می‌شود که به دلیل جذابیت اقتصادی، استفاده از سیستم‌های تولید برق خانگی افزایش یابد. یکی از روش‌های بررسی اقتصادی پروژه‌های مربوط به منابع تجدیدپذیر، روش "ارزش خالص فعلی" می‌باشد. تولیدکننده خانگی در این روش می‌تواند معادل تمام فواید مالی در طول زمان عمر پروژه را در زمان حال مشاهده کند و از آنجا که هر تقاضاکننده به دنبال انتخاب یک فعالیت با بازده بالا و هزینه فرصت مناسب می‌باشد، این روش انتخاب شده است.

بحث سیستم‌های فتوولتائیک و ارزیابی و مدیریت بهینه آن‌ها در ریزشبکه‌ها و به طور خاص ساختمان‌های مسکونی (برق خورشیدی خانگی) از جنبه‌های گوناگونی در مقالات مورد بررسی قرار گرفته است [۴-۱]. شوکلا و همکاران [۵] در مقاله‌ای که در سال ۲۰۱۶ به چاپ رسیده است، به امکان‌سنجی یک سیستم برق خورشیدی در یک مجتمع مسکونی پرداخته است. با استفاده از نرم افزار SolarGIS PV Planner عملکرد یک سیستم برق خورشیدی با ظرفیت ۱۱۰ kW<sub>p</sub> بر اساس تکنولوژی‌های مختلف سلول‌های خورشیدی شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. سعید کمالی [۶] در مقاله‌ای، به ارزیابی مراحل طراحی و بهره‌وری اقتصادی یک سیستم برق خورشیدی خانگی به صورت مجزا از شبکه در قبرس پرداخته و نهایتاً به نتیجه رسیده است که این راه‌کاری مناسب برای منازل مسکونی در قبرس می‌باشد.

گود و همکاران [۷] در مقاله‌ای که در سال ۲۰۱۶ چاپ شده است، به بررسی این مورد پرداخته که طراحی یک سیستم برق خورشیدی خانگی چطور بر میزان انتشار گازهای گل‌خانه‌ای در یک ساختمان تأثیر می‌گذارد. لانگ و همکاران [۸] با استفاده از یک ارزیابی فنی-اقتصادی به بررسی پتانسیل بهره‌گیری از انرژی خورشیدی در ساختمان‌های کوچک و بزرگ خانگی و تجاری در سه کشور مختلف اروپایی پرداخته و عملکرد ساختمان در رابطه با مصرف داخلی و تأمین انرژی از سیستم خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفته است. هونگ و همکاران [۹]، مساحت

در دسترس برای نصب سیستم برق خورشیدی خانگی در بام منازل شهری را با توجه به میزان سایه در فصول مختلف تخمین زده‌اند. بدین منظور، پتانسیل نصب این سیستم بر روی یک ساختمان مورد مطالعه در شهر سئول کره جنوبی مورد بررسی قرار گرفته است. ژانگ و همکاران [۱۰] به ارزیابی فنی-اقتصادی نصب سیستم برق خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی پرداخته است. نهایتاً این نتیجه یافت شده است که با بهره‌گیری از برق خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی تا حدود ۱۰٪ در هزینه برق مشترکان خانگی صرفه‌جویی می‌گردد. تربی و همکاران [۱۱] در مقاله‌ای تحت عنوان "تجزیه و تحلیل سیاست‌های انرژی تجدیدپذیر در جزیره پنگو تایوان" با مدلسازی و ارزیابی سیستم برق خورشیدی در بخش خانگی به مزایا و موانع کاربردی آن پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که بازار و مشوق‌های سرمایه‌گذاری از پارامترهای مهم در توسعه برق تجدیدپذیر خورشیدی در تایوان هستند. مهدوی عادل و همکاران [۱۲] در مقاله‌ای تحت عنوان "ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی برق خورشیدی و برق فسیلی در مصارف خانگی" به امکان‌سنجی استفاده از سیستم برق خورشیدی در شهر مشهد پرداخته که با استفاده از آمار و اطلاعات یک واحد مسکونی تجهیز شده به سلول‌های خورشیدی با نرم‌افزار کامفار انجام گردیده است. نتایج این مطالعه نشان داده است که با مبلغ ۲۰ میلیون تومان نرخ بازده داخلی در یک مجتمع سه واحدی با مصرف متوسط ۴۰۰ کیلو وات ساعت در ماه، در حدود ۲۲ درصد می‌باشد. گرامی و همکاران [۱۳] به بررسی تأثیر سیاست‌های اعمالی برای بهره‌برداری از سیستم‌های فتوولتائیک خانگی پرداخته است. در این مقاله، سیاست‌های کنونی کشور ایران و پتانسیل‌های موجود برای بهره‌برداری سیستم‌های فتوولتائیک بخش خانگی تحلیل شده و با مقایسه این موارد، سناریویی جهت بهره‌برداری بیشتر از فتوولتائیک خانگی ارائه گردیده است، که با اعمال آن در برنامه‌ریزی انرژی به میزان ۳۲۸ میلیون بشکه معادل نفت خام در افق سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۴۱۰ صرفه‌جویی خواهد شد و به میزان ۴۵ میلیون تن معادل کربن گازهای گل‌خانه‌ای کم‌تر تولید می‌شود. نجفی و همکاران [۱۴] در مقاله‌ای به محاسبه دوره بازگشت سرمایه طرح نیروگاه برق خورشیدی ۱ کیلووات، از دیدگاه مشترک خانگی با در نظر گرفتن تعرفه برق و شرایط عمومی آن، و همچنین از دیدگاه دولت با در نظر گرفتن قیمت تمام شده برق، با استفاده از روش‌های اقتصاد مهندسی پرداخته است.

در این مقاله اطلاعات مصرف انرژی الکتریکی در طول سال یک واحد مسکونی در حوالی تهران جمع‌آوری و با نرم افزار SAM<sup>۱</sup> و با کمک پارامترهای اقتصادی از جمله نرخ برق پلکانی و ثابت، نرخ خرید برق تجدیدپذیر و نرخ تنزیل و پارامترهای فنی از جمله بازده پنل خورشیدی، طول عمر، توان و ولتاژ خروجی و اطلاعات جغرافیایی، شبیه‌سازی انجام شده است. با رسم نمودار گردش مالی سیستم و به‌کارگیری روش ارزش خالص فعلی پروژه، به تجزیه و تحلیل نتایج حاصل، پرداخته شده است. این نرم‌افزار، امکانات بسیار مناسبی را به منظور مدل‌سازی سیستم‌های

متر در جنوب متغیر است. شکل ۲، میانگین سالیانه تابش در یک شبانه‌روز در شهر تهران را نشان می‌دهد.

جدول ۲: میزان مصرف انرژی ساختمان در طول یک سال

ماه میلادی	ماه شمسی	میزان مصرف انرژی (kWh)
ژانویه	دی - بهمن	۱۹۹/۵
فوریه	بهمن - اسفند	۲۰۴/۳
مارس	اسفند - فروردین	۲۲۲/۲
آوریل	فروردین - اردیبهشت	۲۳۴/۵
می	اردیبهشت - خرداد	۲۳۷/۹
ژوئن	خرداد - تیر	۵۹۱/۲
جولای	تیر - مرداد	۸۸۸/۱
آگوست	مرداد - شهریور	۴۵۴/۶
سپتامبر	شهریور - مهر	۴۶۰/۳
اکتبر	مهر - آبان	۲۲۲/۸
نوامبر	آبان - آذر	۲۰۹/۷
دسامبر	آذر - دی	۲۰۶/۲

### ۳- فرایند شبیه‌سازی سیستم

#### ۳-۱- داده‌های ورودی پروژه

به‌منظور شبیه‌سازی اقتصادی و فنی این پروژه، از نرم افزار SAM که محصولی از آزمایشگاه انرژی تجدیدپذیر وزارت انرژی ایالات متحده می‌باشد، استفاده شده است. اطلاعات ورودی برای شبیه‌سازی علاوه بر داده‌های هواشناسی، به طور کلی شامل اطلاعات مربوط به سیستم خورشیدی، اطلاعات بار و شبکه و اطلاعات اقتصادی می‌باشد که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

- سیستم توان:

با توجه به میزان بار پایه‌ی ساختمان، برای پروژه ماژول‌های خورشیدی Yingli مدل YL250P-29b انتخاب شده است. توان خروجی این ماژول‌ها برابر با  $250 W_{dc}$  می‌باشد که در نتیجه برای ساختمان، دو ماژول به‌صورت موازی پیش‌بینی شده است تا حدود  $500 W_{dc}$  توان را عرضه کند. همچنین، در سیستم از اینورترهای SMA مدل SB 240 استفاده خواهد شد. تعداد اینورترها نیز ۲ عدد پیش‌بینی شده است. از سوی دیگر، با توجه به این که سیستم خورشیدی به‌صورت متصل به شبکه عمل خواهد کرد، از تعبیه و مدلسازی سیستم ذخیره‌سازی چشم‌پوشی شده است. برای مدل‌سازی کاهش کیفیت عملکرد ماژول‌ها، مقدار ۱٪ کاهش توان خروجی در هر سال منظور شده است. مشخصات کلی سیستم توان خورشیدی در جدول ۳ دیده می‌شود.

- اطلاعات اقتصادی:

از آن‌جایی که هدف اصلی، امکان‌سنجی اقتصادی پروژه می‌باشد، داده‌های اقتصادی و هزینه‌ای پروژه از اهمیت خاصی برخوردار است.

دربگیرنده‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر فراهم کرده و در عین حال، گزینه‌های بسیار گسترده‌ای را در رابطه با مدیریت سمت تقاضا به کاربر ارائه می‌دهد. نوآوری عمده‌ی این مقاله، ارزیابی یکی از مسائل مربوط به مدیریت سمت تقاضا در حضور انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد؛ چرا که تاکنون در مقالات، از این نرم‌افزار تازه انتشار یافته استفاده نگردیده است.

### ۲- مشخصات نمونه‌ی مورد مطالعه

#### ۲-۱- مشخصات ساختمان

ساختمان مورد مطالعه در این مقاله دارای یک طبقه با مساحت ۱۰۵ مترمربع می‌باشد. انتخاب ساختمان یک طبقه در این مورد مطالعاتی به دلیل ساده‌سازی محاسبات بوده که مشخصات آن و همچنین موارد مصرف انرژی الکتریکی در جدول ۱ آمده است. میزان انرژی مصرفی در طول یک سال نیز، به تفکیک ماه‌های مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، بیش‌ترین میزان مصرفی انرژی مربوط به اواسط ماه خرداد تا اوایل ماه مهر می‌شود که از حدود ۴۱۲۷ کیلووات ساعت انرژی در حدود ۲۳۹۴ کیلووات ساعت یعنی در حدود نصف آن مربوط به این ماه‌ها می‌باشد. دلیل این موضوع را می‌توان شروع فصل تابستان و استفاده از لوازم سرمایشی دانست. با توجه به گرم شدن هوا، استفاده از لوازم سرمایشی چون کولرهای آبی، فن‌کویل‌ها و ... بیش‌تر شده که در نتیجه آن میزان مصرف انرژی نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۱: مشخصات کلی ساختمان مسکونی مورد مطالعه

مساحت زیربنای ساختمان	۱۰۵ مترمربع
سال ساخت	۱۳۹۰
تعداد طبقات	۱
تعداد ساکنین	۲
بارهای الکتریکی ساختمان	روشنایی، سرمایش، لوازم الکترونیکی، لوازم برقی خانگی

#### ۲-۲- مشخصات اقلیمی

کشور ایران در بین مدارهای ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی قرار گرفته است و در منطقه‌ای واقع شده که به لحاظ دریافت انرژی خورشیدی در بین نقاط جهان در بالاترین رده‌ها قرار دارد. میزان تابش خورشیدی در ایران بین ۱۸۰۰ تا ۲۲۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع در سال تخمین زده شده است که البته بالاتر از میزان متوسط جهانی است. در ایران به‌طور متوسط سالیانه بیش از ۲۸۰ روز آفتابی گزارش شده است که بسیار قابل توجه می‌باشد (شکل ۱). شهر تهران در ۵۱ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است و ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد بین ۱۸۰۰ متر در شمال تا ۱۲۰۰ متر در مرکز و ۱۰۵۰

با سود ۲۴٪ تأمین شود. بنابراین میزان خالص پرداختی نقدی مشترک حدود ۵۹۵ دلار خواهد بود. طول عمر پروژه ۲۵ سال و نرخ تورم سالیانه نیز ۱۴٪ منظور شده است.

**جدول ۳: مشخصات فنی سیستم توان خورشیدی پیش بینی شده برای پروژه**

مشخصه	مقدار
ماژول خورشیدی	
بازده اسمی (%)	۱۵/۳
توان بیشینه ( $W_{dc}$ )	۲۵۰/۴۹
ولتاژ توان بیشینه ( $V_{dc}$ )	۳۰/۴
جریان توان بیشینه ( $A_{dc}$ )	۸/۲
مساحت ماژول ( $m^2$ )	۱/۶۲
اینورتر	
توان بیشینه dc ( $W_{dc}$ )	۲۵۰
توان بیشینه ac ( $W_{ac}$ )	۲۴۰
بازده (%)	۹۵/۸
ولتاژ ac اسمی ( $V_{ac}$ )	۲۴۰

**جدول ۴: خلاصه اطلاعات اقتصادی سیستم خورشیدی**

عنوان	هزینه واحد	هزینه کل (\$)
هزینه‌های مستقیم		
ماژول خورشیدی	۱/۲ \$/ $W_{dc}$	۶۰۱/۱۹
اینورتر	۰/۳۵ \$/ $W_{dc}$	۱۷۵/۳۵
تجهیزات BOS	۱ \$/ $W_{dc}$	۵۰۰/۹۹
دستمزد نصب	+ ۰/۳ \$/ $W_{dc}$ ۱۵۰ \$	۳۰۰/۳
حاشیه سود شرکت نصب‌کننده	۱ \$/ $W_{dc}$	۵۰۰/۹۹
هزینه‌های غیرمستقیم		
اخذ مجوز و غیره	۰/۱ \$/ $W_{dc}$	۵۰/۱
پایه مالیات فروش	۵٪ از هزینه مستقیم	۶۰/۳۹
جمع کل هزینه‌های نصب		۲۱۸۹/۲
کل هزینه‌ی نصب به ازای ظرفیت ( $$/W_{dc})$		۴/۳۷

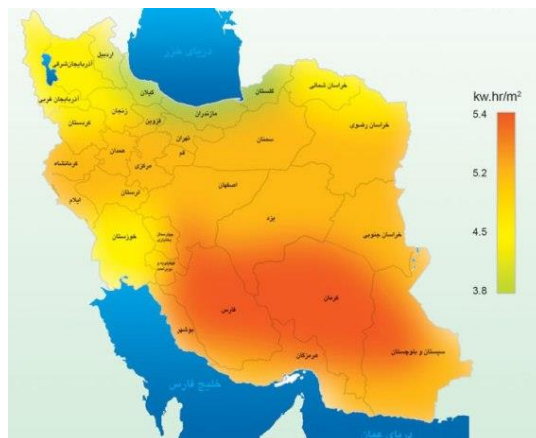
### ۲-۳- روندهای شبیه‌سازی

همان‌طور که ذکر شد، هدف از انجام این پروژه، مقایسه میان اثر انواع روش‌های قیمت‌گذاری برق شبکه بر میزان توجیه‌پذیری اقتصادی پروژه‌های برق خورشیدی خانگی می‌باشد. بدین منظور، شبیه‌سازی در دو حالت زیر انجام گرفته است:

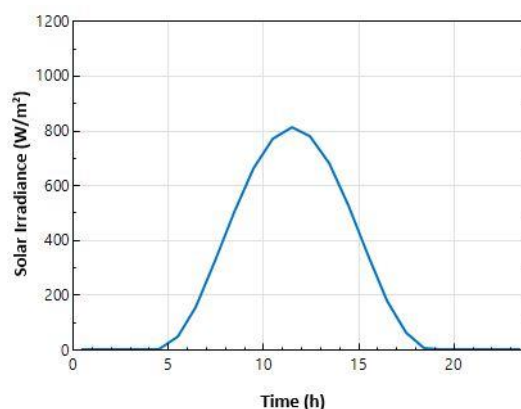
- حالت ۱: قیمت خرید برق از شبکه ثابت<sup>۲</sup> در نظر گرفته شود.
  - حالت ۲: قیمت برق بسته به میزان مصرف و زمان مصرف، به صورت پلکانی<sup>۳</sup> محاسبه شود.
- در حال حاضر، با توجه به نوع کنتورهای برق نصب‌شده در کشور، هر دو نوع قیمت‌گذاری وجود دارد.

نرم‌افزار SAM، از امکانات مدل‌سازی اقتصادی کاملی بهره‌مند است که به وسیله آن می‌توان تمام پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر را ارزیابی اقتصادی نمود.

داده‌های اقتصادی به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: نخست اطلاعات مربوط به هزینه‌ی نصب سیستم خورشیدی را شامل می‌شود. در ادامه، اطلاعات مربوط به بازار، مشوق‌های دولتی و به‌طور کلی مقادیر پارامترهای مالی و اقتصادی را در بر می‌گیرد. جدول ۴ خلاصه‌ای از اطلاعات مربوط به هزینه‌ی نصب سیستم را ارائه می‌دهد. علاوه بر هزینه‌ی نصب، هزینه‌های نگهداری نیز مدنظر قرار می‌گیرد. در این پروژه، هزینه ثابت نگهداری برابر با ۱۵ دلار در سال برآورد شده است که به ازای هر سال ۲٪ افزایش می‌یابد. همچنین هزینه نگهداری بر واحد توان نیز معادل ۲۵ دلار بر کیلووات در هر سال تخمین زده شده است.



شکل ۱: میزان تابش خورشید در ایران



شکل ۲: میزان تابش میانگین سالیانه خورشید در طول یک شبانه روز

طبق جدول ۴، هزینه کلی نصب حدود ۲۱۸۹/۲ دلار خواهد بود. طبق مصوبه‌ی دولت، وزارت نیرو معادل نیمی از هزینه‌ی نصب پروژه‌های خورشیدی خانگی تا سقف ۵ میلیون تومان را به صورت بلاعوض پرداخت می‌کند. به همین منظور ۱۰۰۰ دلار از مقدار فوق را دولت به صورت مشوق تأمین خواهد کرد. همچنین پیش‌بینی شده است که نیمی از هزینه اولیه‌ی باقیمانده، یعنی ۱۱۸۹/۲ دلار، از طریق وام بانکی سه ساله

شاخص‌های اقتصادی سیستم در دو حالت متفاوت است. می‌توان گفت که دو شاخص مهم در ارزیابی سیستم، ارزش خالص کنونی و دوره بازگشت سرمایه است. دیده می‌شود که ارزش خالص فعلی برای حالت قیمت‌گذاری پلکانی بیش‌تر از حالت ثابت بوده و نشان می‌دهد که سیستم از نظر اقتصادی در حالت دوم ارزش بالاتری دارد. همچنین دوره بازگشت سرمایه در حالت اول، ۶/۵ سال به‌دست آمده در حالی که در حالت دوم، به ۵/۲ سال کاهش پیدا کرده؛ در نتیجه از این منظر نیز قیمت‌گذاری پلکانی بر ثابت ارجح است.

مشاهده می‌شود که هزینه برق مشترک با نصب سیستم خورشیدی به وضوح کاهش پیدا کرده که باعث صرفه‌جویی در هزینه‌های مشترک می‌شود. این صرفه‌جویی در حالت اول حدود ۴۷/۶ درصد و در حالت دوم حدود ۴۶ درصد بوده است. شکل‌های ۳ و ۴ به‌ترتیب نمودار جریان نقدی پروژه در دو حالت اول و دوم را نشان می‌دهد.

جدول ۶: نتایج حاصل از شبیه‌سازی در دو حالت

شاخص	مقدار در حالت اول	مقدار در حالت دوم
انرژی تولیدی سالیانه (سال اول - kWh)	۹۵۰	۹۵۰
ضریب ظرفیت (سال اول - %)	۲۱/۷	۲۱/۷
LCOE (cents/kWh)	۸/۷۶	۸/۷۶
هزینه برق بدون سیستم خورشیدی (سال اول - \$)	۱۰۳	۱۳۷
هزینه برق با سیستم خورشیدی (سال اول - \$)	۵۴	۷۴
صرفه‌جویی خالص حاصل از نصب سیستم (سال اول - \$)	۴۹	۶۳
ارزش خالص کنونی (\$)	۲۴۶۸	۳۷۰۹
دوره بازگشت سرمایه (سال)	۶/۵	۵/۲
خالص هزینه فعلی (\$)	۱۱۸۹	۱۱۸۹

شکل ۵ و ۶ به‌ترتیب، میزان هزینه پرداختی مشترک قبل و بعد از نصب سیستم، در دو حالت اول و دوم را نشان می‌دهد. با توجه به نرخ نسبتاً مناسب خرید تضمینی برق، مشاهده می‌شود که پس از نصب سیستم خورشیدی، هزینه‌های پرداختی مشترک کاهش پیدا کرده و در برخی از ماه‌ها نیز منفی شده و به‌عبارتی سیستم برای مشترک سودآوری خواهد داشت. همچنین با مقایسه دو شکل، دیده می‌شود که سوددهی پروژه در حالت نرخ‌گذاری پلکانی بیش از حالت ثابت بوده که موید مقادیر ارائه شده‌ی هزینه‌ی برق در جدول ۶ است.

نهایتاً، شکل ۷ پروفایل بار ماهیانه ساختمان، تولید ماهیانه سیستم خورشیدی و تبادل توان با شبکه را به‌طور میانگین نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در اکثر ساعات سال تبادل توان ساختمان با شبکه منفی بوده، یعنی برق خورشیدی پاسخ‌گوی بار ساختمان نبوده و ساختمان از شبکه برق دریافت می‌کند. در ساعاتی که توان تولیدی خورشیدی بیش از نیاز ساختمان است، تراز تبادل با شبکه مثبت شده و ساختمان به شبکه برق مازاد را می‌فروشد. این امر در تمام ماه‌های

یکی از سیاست‌هایی که در بسیاری از کشورها در جهت ترغیب مشترکین به استفاده از سیستم‌های توان تجدیدپذیر (به خصوص خورشیدی در مشترکین خانگی) مورد استفاده قرار می‌گیرد، طرح خرید تضمینی برق<sup>۴</sup> تولیدی توسط سیستم تجدیدپذیر از مشترک است. در ایران این طرح با فراز و فرودهای فراوانی اجرا شده است. در آخرین مصوبه وزارت نیرو، میزان خرید تضمینی برق تجدیدپذیر سیستم‌های خورشیدی کم‌تر از ۲۰ کیلووات برابر با ۸۰۰۰ ریال به ازای هر کیلووات ساعت می‌باشد که نسبت به میانگین جهانی رقم نسبتاً مناسبی بوده و در صورت اجرایی شدن دقیق، می‌تواند کمک شایانی به گسترش استفاده از سیستم‌های خانگی خورشیدی نماید. به‌منظور شبیه‌سازی این مورد، قیمت خرید برق تولیدی معادل ۲۰ سنت در هر دو حالت قیمت‌گذاری فوق منظور شده است.

از سوی دیگر، قیمت برق شبکه نیز می‌بایست به دو صورت اعمال شده و خروجی‌ها در دو حالت بررسی شود: در حالت نخست و قیمت‌گذاری ثابت، هر کیلووات ساعت معادل \$ ۰/۲۵ منظور شده است که معادل با قیمت میانگین حدود ۱۰۰ تومان خواهد بود. اما در حالت دوم، قیمت بر اساس ساعت و میزان مصرف مشترک، متفاوت خواهد بود. نحوه قیمت‌گذاری در این حالت در جدول ۵ مشاهده می‌شود. قیمت‌های وارد شده در این حالت تقریباً معادل با مقادیر کنونی در قبوض ساختمان مورد مطالعه می‌باشد. در عین حال، شیوه محاسبات نرم‌افزار تا حدودی با شیوه‌ی محاسبه مرسوم در قبوض مشترکین کمی متفاوت است. اگر چه، این تفاوت اندک، تأثیر چندانی بر خروجی محاسبات ندارد.

جدول ۵: نرخ‌های برق منظور شده در شبیه‌سازی در حالت دوم

پله	اوج بار (ساعت ۱۶ تا ۲۲)		میان باری (ساعت ۶ تا ۱۵)		کم باری (ساعت ۲۳ تا ۵)	
	مصرف بیشینه kWh	نرخ برق c/kWh	مصرف بیشینه kWh	نرخ برق c/kWh	مصرف بیشینه kWh	نرخ برق c/kWh
۱	۱۰۰	۱/۵	۱۰۰	۱/۲	۱۰۰	۱
۲	۲۰۰	۱/۷	۲۰۰	۱/۴	۲۰۰	۱/۲
۳	۳۰۰	۳/۸	۳۰۰	۳	۳۰۰	۲/۴
۴	۴۰۰	۶/۹	۴۰۰	۵/۵	۴۰۰	۴/۴
۵	۵۰۰	۸	۵۰۰	۶/۴	۵۰۰	۵/۱
۶	۶۰۰	۱۰/۱	۶۰۰	۸	۶۰۰	۶/۵

#### ۴- نتایج

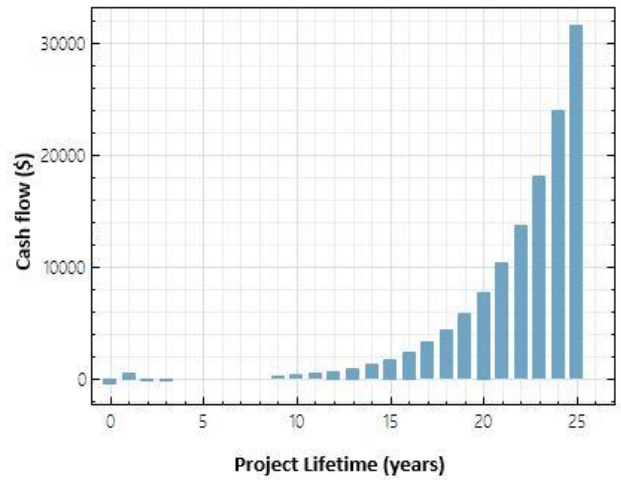
##### ۴-۱- نتایج شبیه‌سازی

پس از پیاده‌سازی و انجام شبیه‌سازی دو حالت فوق در نرم‌افزار SAM، نتایج خروجی به‌دست می‌آید. جدول ۶ خلاصه نتایج شبیه‌سازی در دو حالت را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در برخی موارد که مربوط به عملکرد فنی سیستم است، نتایج یکسانی به‌دست آمده است. اما

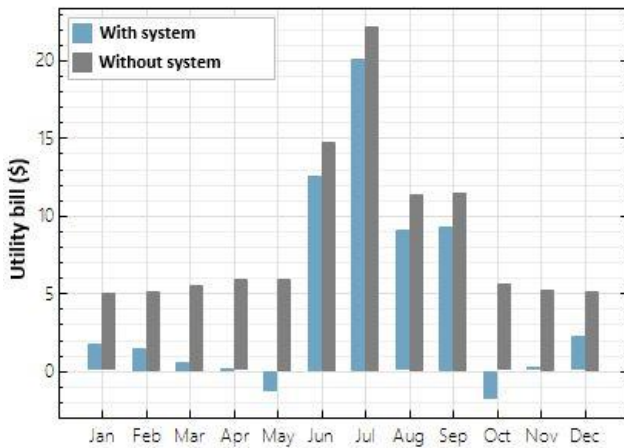
گرفته شدند. تحلیل حساسیت بدین صورت انجام گرفت که با کاهش و افزایش ۲۰ درصدی در میزان پارامترهای ورودی، اثر این تغییر در مقدار پارامترهای خروجی سنجیده شد.

شکل‌های ۸ و ۹، به ترتیب، نتایج تحلیل حساسیت در حالت‌های اول و دوم را نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود، به ازای ۲۰٪ کاهش و افزایش در مقدار تورم، در حالت اول، ارزش خالص فعلی به ترتیب به ۲۷۵۶ و ۲۲۱۶ دلار و مدت بازگشت سرمایه به ۶/۷ و ۶/۴ سال می‌رسد، در حالی که در حالت دوم، مقادیر ۴۱۱۱ و ۳۳۵۸ برای ارزش خالص فعلی و مقادیر ۵/۳ و ۵/۱ برای دوره بازگشت سرمایه به دست آمده است. همچنین، با ۲۰٪ کاهش و افزایش در مقدار کمک هزینه دولت، در حالت اول، ارزش خالص فعلی به ترتیب به ۲۳۲۴ و ۲۶۱۳ دلار و دوره بازگشت سرمایه به ۷/۴ و ۵/۲ سال تغییر می‌کنند، در حالی که در حالت دوم، ارزش خالص فعلی به ۳۵۶۵ و ۳۸۵۴ دلار و دوره بازگشت سرمایه به ۶/۱ و ۳/۹ سال تبدیل می‌شوند.

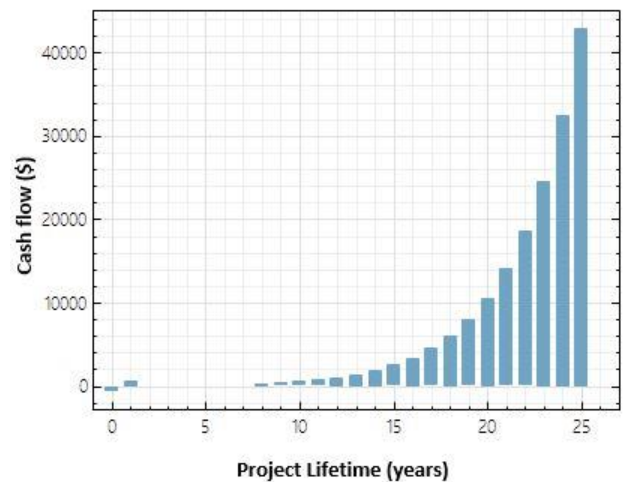
سال، به جز چهار ماه میانی و گرم سال محقق شده و موجب درآمدزایی برای ساختمان می‌گردد.



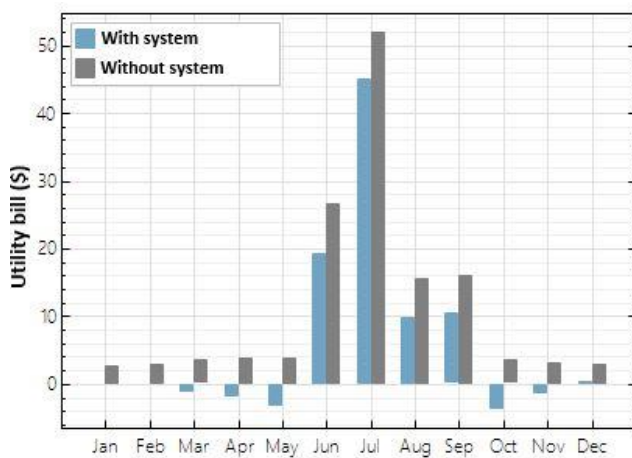
شکل ۳: نمودار جریان نقدی برای حالت اول



شکل ۵: میزان هزینه پرداختی مشترک قبل و بعد از نصب سیستم خورشیدی در حالت اول



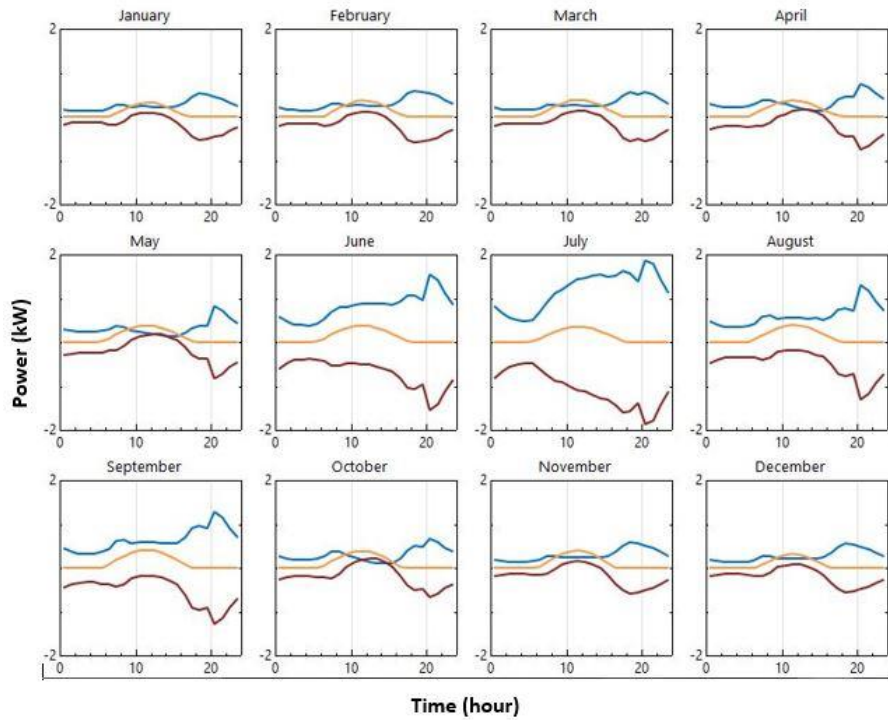
شکل ۴: نمودار جریان نقدی برای حالت دوم



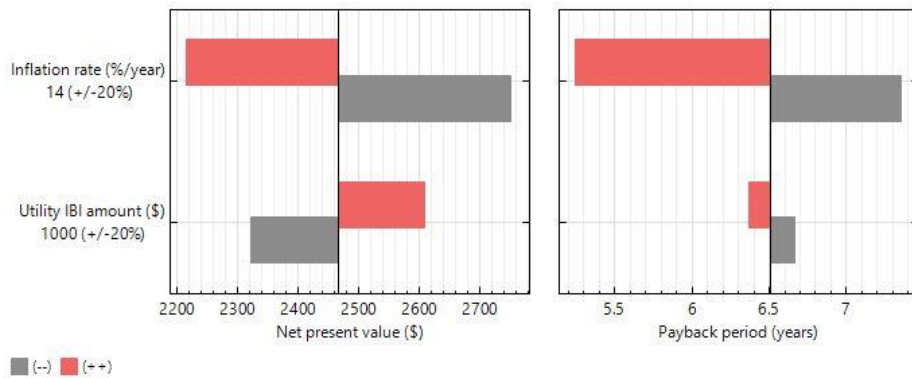
شکل ۶: میزان هزینه پرداختی مشترک قبل و بعد از نصب سیستم خورشیدی در حالت دوم

#### ۲-۴- تحلیل حساسیت

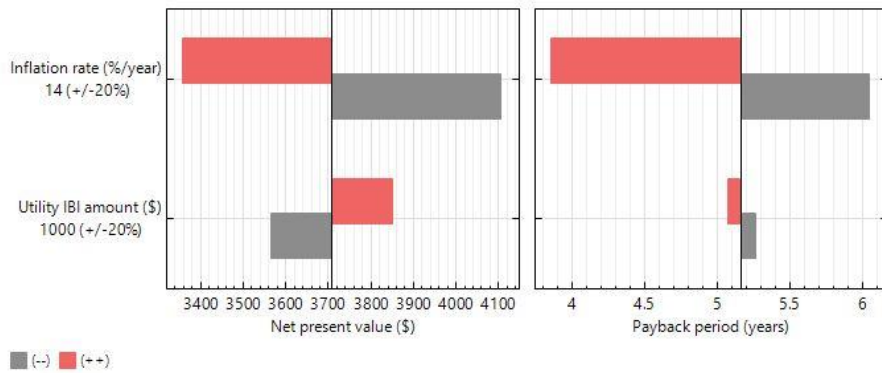
به منظور تحلیل عدم قطعیت‌ها در پروژه، یک تحلیل حساسیت انجام گرفته است. اساساً در طول عمر پروژه‌های مدیریت انرژی، در نظر گرفتن تغییرات احتمالی پارامترهای ورودی و اثر آن بر روی مقادیر خروجی از اهمیت خاصی برخوردار است. در همین راستا، با استفاده از یکی از ماکروهای از پیش تعریف شده در نرم‌افزار SAM، تحلیل حساسیت در پروژه اعمال شده است. بدین منظور، دو پارامتر ورودی اقتصادی شامل نرخ تورم و میزان کمک هزینه‌ی دولت به مشترک برای نصب سیستم خورشیدی می‌شود. از سوی دیگر، مقدار ارزش خالص فعلی و مدت زمان بازگشت سرمایه به عنوان پارامترهای هدف در تحلیل حساسیت در نظر



شکل ۷: نمودار ماهیانه بار الکتریکی ساختمان (a)، انرژی تولیدی سیستم خورشیدی (b) و میزان تبادل انرژی ساختمان با شبکه (c)



شکل ۸: نتایج تحلیل حساسیت برای حالت اول قیمت‌گذاری



شکل ۹: نتایج تحلیل حساسیت برای حالت دوم قیمت‌گذاری

## ۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر دو نوع روش قیمت‌گذاری برق بر میزان توجیه‌پذیری اقتصادی یک سیستم توان خورشیدی خانگی مورد بررسی قرار گرفت. دیده شد که در مجموع، پروژه در قیمت‌گذاری پلکانی/زمانی به نسبت قیمت‌گذاری ثابت بازدهی اقتصادی بهتری داشته و ارزش خالص فعلی پروژه و نیز دوره‌ی بازگشت سرمایه در حالت پلکانی وضعیت مطلوب‌تری را دارا می‌باشد. از آن‌جا که قیمت‌گذاری پلکانی/زمانی یکی از روش‌های مهم در مدیریت سمت تقاضا بوده و از اهمیت خاصی در این حوزه برخوردار است، می‌توان گفت که از منظر سوددهی در هنگام نصب سیستم‌های برق خورشیدی برای مشترک نیز نسبت به حالت قیمت‌گذاری ثابت ارجح بوده و می‌تواند موجبات انتفاع هر دو بخش عرضه (شبکه) و تقاضا (مشترک) را فراهم آورد. بنابراین، می‌توان گفت که وزارت نیرو، می‌تواند با تسریع در تعویض کنتورهای قدیمی با کنتورهای جدید و نیز، تسهیل در گسترش سیستم‌های برق خورشیدی خانگی، هم روند مدیریت سمت تقاضا را بهبود بخشیده و هم با افزایش ظرفیت تولید پراکنده در کشور، به بهبود وضعیت شبکه‌ی برق کشور کمک شایانی نماید.

## مراجع

- [5] A. K. Shukla, K. Sudhakar, and P. Baredar. "Simulation and performance analysis of 110 kW p grid-connected photovoltaic system for residential building in India: A comparative analysis of various PV technology." *Energy Reports*, vol. 2, pp. 82-88, 2016.
- [6] S. Kamali. "Feasibility analysis of standalone photovoltaic electrification system in a residential building in Cyprus." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 1279-1284, 2016.
- [7] C. Good, T. Kristjansdottir, A. Houlihan Wiberg, L. Georges, and A. G. Hestnes. "Influence of PV technology and system design on the emission balance of a net zero emission building concept." *Solar Energy*, vol. 130, pp. 89-100, 2016.
- [8] T. Lang, D. Ammann, and B. Girod. "Profitability in absence of subsidies: A techno-economic analysis of rooftop photovoltaic self-consumption in residential and commercial buildings." *Renewable Energy*, vol. 87, pp. 77-87, 2016.
- [9] T. Hong, M. Lee, Ch. Koo, J. Kim, and K. Jeong. "estimation of the available rooftop area for installing the rooftop solar photovoltaic (pv) system by analyzing the building shadow using hillshade analysis." *Energy Procedia*, vol. 88, pp. 408-413, 2016.
- [10] X. Zhang, M. Li, Y. Ge, and G. Li. "Techno-economic feasibility analysis of solar photovoltaic power generation for buildings." *Applied Thermal Engineering*, vol. 108, pp. 1362-1371, 2016.
- [11] A. JC Trappey, C. V. Trappey, G. YP Lin, and Yu-Sheng Chang. "The analysis of renewable energy policies for the Taiwan Penghu island administrative region." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 1, pp. 958-965, 2012.
- [۱۲] محمد حسین مهدوی عادل، مصطفی سلیمی فر، اعظم قزل باش، «ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی برق خورشیدی و برق فسیلی در مصارف خانگی»، مجله علمی پژوهشی سیاست گذاری اقتصادی، سال ششم، شماره یازدهم، ۱۳۹۳.
- [۱۳] رضا گرامی، امیرعباس درویش، لیلی لواسان‌پور، «بررسی تأثیر سیاست‌های اعمالی برای بهره‌برداری از سیستم‌های فتوولتائیک خانگی بر برنامه‌ریزی انرژی و پیشنهاد سناریوی نو (افق سال ۱۴۱۰)»، کنفرانس بین‌المللی مهندسی برق، تهران، سازمان پژوهشی باقرالعلوم (ع)، ۱۳۹۵.
- [۱۴] پویا نجفی، مزگان بشیری، مریم دادخواه، «تأثیر قیمت برق بر دوره بازگشت سرمایه سامانه‌های انرژی خورشیدی فتوولتائیک برای مشترکین خانگی در حضور بارانه عوارض برق و تعرفه تشویقی کاهش انتشار گازهای گل‌خانه‌ای»، چهارمین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی، تهران، ۱۳۹۳.
- [1] M. Marzband, S. S. Ghazimirsaeid, H. Uppal, and T. Fernando. "A real-time evaluation of energy management systems for smart hybrid home Microgrids." *Electric Power Systems Research*, vol. 143, pp. 624-633, 2017.
- [۲] معصومه جوادی، موسی مرزبند، سیدمازیار میرحسینی مقدم، «مدیریت بهینه ریزشبکه‌ها به همراه استراتژی قیمت‌گذاری بر پایه روش تئوری بازی با در نظر گرفتن ائتلاف منابع تولید»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۴، زمستان ۹۵.
- [3] M. Marzband, N. Parhizi, and J. Adabi. "Optimal energy management for stand-alone microgrids based on multi-period imperialist competition algorithm considering uncertainties: experimental validation." *International transactions on electrical energy systems*, vol. 26, pp. 1358-1372, 2016.
- [۴] معصومه جوادی، سیدمازیار میرحسینی مقدم، موسی مرزبند، «مدیریت بهینه انرژی ریزشبکه‌ها در بازار خرده‌فروشی بر پایه روش تئوری بازی

## زیرنویس‌ها

<sup>1</sup> System Advisor Model

<sup>2</sup> Flat Energy Rates

<sup>3</sup> Time-of-Use (TOU) and Tiered Energy Rates

<sup>4</sup> Feed-in-Tariff (FIT)