

## آنالیز و ارزیابی مدل اقتصادی ریزشبکه سیستم فتوولتائیک

### متصل به شبکه توزیع برق ایران<sup>۱</sup>

علی‌رضا برزی

دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی دانشگاه آزاد تهران جنوب، [alirezabarzi961@gmail.com](mailto:alirezabarzi961@gmail.com)

غلامرضا هاشم زاده خوراسگانی\*

دانشیار گروه مدیریت صنعتی دانشگاه آزاد تهران جنوب، [gh\\_hashemzadeh@azad.ac.ir](mailto:gh_hashemzadeh@azad.ac.ir)

کیامرث فتحی هفشجانی

استادیار گروه مدیریت صنعتی دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، [Fathi@azad.ac.ir](mailto:Fathi@azad.ac.ir)

ابوتراب علی رضایی

دانشیار گروه مدیریت صنعتی دانشگاه آزاد تهران جنوب، [a\\_alirezaee@azad.ac.ir](mailto:a_alirezaee@azad.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۵/۰۱ تاریخ پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۳

### چکیده

یکی از چالش‌ها در عدم توسعه ریزشبکه سیستم فتوولتائیک، عدم بازگشت سرمایه به همراه هزینه‌های آن در کمترین زمان می‌باشد. در این پژوهش یک مسئله جدید جهت ارائه مدل اقتصادی و مدیریت انرژی ریزشبکه سیستم فتوولتائیک، با استفاده از ساعات آفتابی، مدل رگرسیونی شدت تابش و استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل به منظور کمینه کردن فضای نصب، جهت ماکزیمم انرژی تولیدی و درآمد حاصل از آن برای شهرهای ایران ارائه شده است. نتایج بازگشت سرمایه برای پنج شهر یزد، اردبیل، گرگان، اهواز و تهران در حالت نرمال و بهینه، نشان دهنده سرعت بازگشت سرمایه در شهر یزد و کاهش آن در شهر گرگان می‌باشد. بازگشت سرمایه سیستم فتوولتائیک منصوبه در شهرها، به داده‌های هواشناسی، محل جغرافیایی و شناسایی نقطه بهینه تابع هدف وابسته است. همچنین جهت بررسی داده‌ها، سیستم فتوولتائیک منصوبه با قدرت‌های ۵ و ۸.۶ کیلووات در شهر تهران مقایسه شده، که نشان دهنده اقتصادی بودن مدل و همچنین صحیح قرار گرفتن دو شهر تهران و اهواز در یک ناحیه می‌باشد. با پایدار بودن شبکه توزیع برق و کاهش تاثیر خاموشی‌ها، در فعالیت مشترک، می‌توان از ذخیره‌کننده انرژی سیستم صرف نظر کرد، که باعث سرعت کاهش زمان برگشت سرمایه و هزینه‌ها می‌شود. اقتصادی بودن، پایداری سیستم و شبکه برق، قضیه دو شرطی این مدل است، که سیاست‌گزاران می‌توانند، با برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری، این سیستم را در کشور توسعه و باعث پایداری شبکه توزیع برق کشور و نیروی انسانی شوند.

**واژه‌های کلیدی:** هزینه، درآمد، انرژی، شبکه توزیع، سیستم فتوولتائیک.

**طبقه‌بندی JEL:** Q43، Q41، Q47، Q42، Q20، Q48.

<sup>۱</sup> این مقاله مستخرج از رساله نویسنده اول در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب است.

\* نویسنده مسئول مکاتبات

## ۱-مقدمه

توجه به آمار آژانس بین‌المللی انرژی تا سال ۲۰۳۰ رشد مصرف انرژی در کشورهای صنعتی و توسعه یافته محدود شده، ولی کشورهای غیر صنعتی به شدت با رشد مصرف انرژی روبرو هستند، که این امر بسیار نگران‌کننده است. یکی از چالش‌های مشترکین و یا بنگاه‌های اقتصادی در توسعه و تولید انرژی ریزش‌بکه‌های سیستم فتوولتائیک عدم بازگشت سرمایه در کمترین زمان می‌باشد. مطالعات زیادی در زمینه سیستم‌های فتوولتائیک از دیدگاه تحلیلی، پارامترهای الکتریکی، نحوه کنترل و سنکرون کردن آن به شبکه برق و بعضی مطالعات موردی بررسی شده، ولی کمتر با نگرش کاربردی و از دیدگاه علوم انسانی و پایه به آن پرداخته شده است. در این پژوهش یک مسئله جدید جهت مدیریت انرژی ریزش‌بکه جریان مستقیم سیستم فتوولتائیک با استفاده از داده‌های هواشناسی و ماکزیمم کردن انرژی تولیدی ریزش‌بکه‌های جریان مستقیم سیستم فتوولتائیک بدنبال اقتصادی کردن هزینه‌های نصب آن و بازگشت سرمایه در کمترین زمان، ارائه شده است. در این پژوهش از الگوریتم کلونی زنبورعسل به عنوان یک الگوریتم فراابتکاری برای بهینه‌سازی سیستم فتوولتائیک به منظور افزایش تولید انرژی و کمینه کردن بازگشت سرمایه استفاده شده است. از میان روش‌های بهینه‌سازی، روش‌های فراابتکاری مانند خرد جمعی به یکی از حوزه‌های مهم پژوهشی برای پژوهشگران با زمینه‌های کاری گوناگون تبدیل شده است. خرد جمعی را می‌توان به هرگونه تلاشی جهت طراحی الگوریتم‌ها و یا ابزارهای توزیع یافته‌ی حل مسئله، که از رفتار جامعه کلونی حشرات و سایر جوامع حیوانی الهام گرفته شده است اطلاق نمود. الگوریتم‌هایی مانند زنبور عسل، مورچگان، پرندگان و غیره از جمله روش‌های محاسباتی خرد جمعی می‌باشند که از مجموعه‌ای سازمان یافته از حشرات و یا حیوانات تشکیل شده‌اند که جهت یافتن منابع غذایی با یکدیگر همکاری دارند. در روش‌های خرد جمعی، رفتار جمعی مجموعه، فقط وابسته به رفتار فردی هر یک از اعضای تشکیل دهنده اجتماع نیست بلکه به چگونگی تعامل میان آنها نیز وابسته است. تعامل بین اعضا، تجربه‌ی آنها درباره‌ی محیط را افزایش می‌دهد و موجب پیشرفت مجموعه و رسیدن به منبع غذایی مناسب می‌شود در خرد جمعی اعضای یک گروه اطلاعات را به صورت موضعی تبادل می‌کنند تا به یک جواب فراگیر برسند. روش حل در این الگوریتم‌ها مسأله‌ای مرکزی نیست، یعنی حل مسأله به عهده شخص خاصی نیست،

بلکه بین تمامی اعضا پخش شده است (قائمی راد و کریمی<sup>۱</sup>، ۱۳۹۳). دلیل اینکه چرا از میان الگوریتم‌های مختلف، زنبور عسل انتخاب شده است، این است که:

✓ به کارگیری الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل در شناسایی نقاط بهینه انرژی تولیدی سیستم‌های فتوولتائیک به منظور کمینه کردن زمان بازگشت سرمایه تاکنون استفاده نشده است (کاربردی جدید)

✓ سادگی منطق به کار رفته در الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل (سادگی پیاده‌سازی)

✓ موفقیت روش‌های فراابتکاری در مساله تولید وابسته به فرآیند جستجوی محلی است، که لازم است از روش‌هایی برای حل مسئله استفاده شود، که بتوانند فضای جواب را به خوبی کاوش نمایند، الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت می‌توانند جواب‌های مطلوبی در این مساله ارائه نمایند (عبدالمجید<sup>۲</sup>، ۲۰۱۵)، به همین دلیل در این پژوهش از یک الگوریتم جمعیتی استفاده شده است.

کشورهایی مانند آمریکا و اروپا به سمت کاهش مصرف انرژی فسیلی پیش می‌روند، ولی این امر در خاورمیانه و خصوصاً ایران رو به افزایش است. میزان مصرف انرژی برق در کشور به صورت فصلی بوده، به طوری که در تابستان بار روی شبکه‌های برق بسیار زیاد و در فصل‌های دیگر از سال، این بار روی شبکه کمتر است. عدم تعادل بین شدت و ضریب مصرف انرژی الکتریکی و کاهش خاموشی‌ها با استفاده از نظریه پویایی سیستمی در شبکه‌های توزیع (قاسمیان و همکاران<sup>۳</sup>، ۱۳۹۶)، تولید انرژی خورشیدی (اورچی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۸) در کشورهای توسعه یافته موفقیت‌آمیز و در کشورهای در حال توسعه در این زمینه ناموفق بوده است (آنند و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۰۹). کشورهای پیشرفته و در حال توسعه و بخصوص کشورمان توجه فزاینده‌ای به انرژی تجدیدپذیر (فتوولتائیک)، جهت ایجاد تنوع در استفاده از منابع انرژی و کاهش وابستگی به یک حامل انرژی و ملاحظات زیست‌محیطی برای دستیابی به انرژی پایدار معطوف داشته‌اند (امی و

<sup>1</sup> GHaemirad & Karimi (2015)

<sup>2</sup> Abdelmaguid

<sup>3</sup> GHasemian et al. (2018)

<sup>4</sup> Orchi

<sup>5</sup> Anand et al.

همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۱۷). پیش‌بینی انرژی در بخش خانگی و تجاری با استفاده از بهینه انبوه ذرات (مومنی و همکاران<sup>۲</sup>، ۱۳۹۴) و پویایی انرژی تولیدکننده پراکنده در شبکه برق با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات (چای و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۱۷)، مدیریت ظهور انرژی‌های غیرمتمرکز و عرضه و تقاضای آن در هلند (ون در استلت و همکاران<sup>۴</sup>، ۲۰۱۷)، همچنین استراتژی مدیریت انرژی در ریزشبکه‌ها جهت تامین برق وسایل نقلیه الکتریکی (تورس مورنو و همکاران<sup>۵</sup>، ۲۰۱۸)، از سویی دیگر چالش‌های فنی و ارتقاء پایداری این سیستم (تمی تایو و همکاران<sup>۶</sup>، ۲۰۱۸)، موجب توسعه و تحقیقات در کلیه کشورها شده است. همچنین بررسی باطری اسید سرب به‌عنوان ذخیره‌کننده انرژی (کومار<sup>۷</sup>، ۲۰۱۶)، برنامه‌ریزی انرژی توزیع هوشمند ساختمان‌ها و دیگر موارد، مورد توجه محققین کشورها قرار دارد (پدرسا و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۱۱). در کشورما به علت شرایط خاص تولید انرژی خورشیدی نامناسب بوده و مشترکین و یا بنگاه‌های اقتصادی انگیزه-ای برای نصب آن ندارند. هرچند که وزارت نیرو و شرکت‌های وابسته به آن در این زمینه در حال تحقیق هستند. ایجاد نقشه راهبردی کشورها مانند ژاپن، چین و کشورهای اروپایی جهت استفاده بهینه از این انرژی (زینمان و همکاران<sup>۹</sup>، ۲۰۱۵)، کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و افزایش تولید انرژی (مولایی و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۱۳۹۴)، همچنین مدیریت انرژی را بررسی نموده‌اند (کومار و همکاران<sup>۱۱</sup>، ۲۰۱۴). رابطه‌ی بین رشد اقتصادی کشورها (تانگ و همکاران<sup>۱۲</sup>، ۲۰۱۶)، مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر (انتنوس و همکاران<sup>۱۳</sup>، ۲۰۱۸)، ارزش‌گذاری اقتصادی (موسوی و همکاران<sup>۱۴</sup>، ۱۳۹۶) و همچنین کاهش آلودگی و افزایش محیط پاک (صادقی و همکاران<sup>۱۵</sup>، ۱۳۹۴) را مورد

<sup>1</sup> Amy et al.

<sup>2</sup> Momeni et al. (2016)

<sup>3</sup> Cai et al.

<sup>4</sup> Van der Stelt et al.

<sup>5</sup> Torres-Moreno et al.

<sup>6</sup> Temitayo

<sup>7</sup> Kumar

<sup>8</sup> Pedrasa et al.

<sup>9</sup> Zinaman et al.

<sup>10</sup> Molaee et al. (2016)

<sup>11</sup> Kumar et al.

<sup>12</sup> Tang et al.

<sup>13</sup> Ntanos et al.

<sup>14</sup> Mosavi et al. (2018)

<sup>15</sup> Sadeghi et al. (2016)

پژوهش قراردادده‌اند. مطالعات در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر ریزشکده‌ها بخصوص سیستم‌های فتوولتائک در ایران و کشورهای دیگر جهت کاهش هزینه احداث سیستم فتوولتائیک ادامه دارد و این تحقیقات منجر به کاهش وابستگی به انرژی فسیلی و افزایش استفاده از انرژی پاک شده است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های هواشناسی و طبقه بندی جغرافیایی استان‌های ایران، شدت تابش هر ناحیه شبیه‌سازی شده، سپس درآمد حاصل از فروش ماکزیمم انرژی تولیدی بدست آمده است. پارامترهای اقتصادی و هزینه‌ها بررسی و در نهایت مدل اقتصادی ارائه شده است. از نرم‌افزارهای Exel و Matlab جهت شبیه‌سازی استفاده شده است.

## ۲. ادبیات موضوع

صنعت برق به خاطر نقش زیربنایی و ارتباط زیادی که با کلیه عوامل موثر بر رشد اقتصادی دارد، صنعتی پویا و تاثیرگذار است. با توجه به فراگیری گسترده انرژی برق می‌توان آن را به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل بسترساز توسعه اقتصادی کشور محسوب کرد. طبق آمار و اطلاعات وزارت نیرو (۱۳۹۴) و برنامه وزیر نیرو برای تصدی وزارت (۱۳۹۶) آمده، در سال ۱۳۹۴ روزانه یک میلیارد کیلووات ساعت مصرف انرژی در کشور تولید شده، که در زمان پیک‌بار لحظه‌ای افزون بر ۵۰ هزار مگاوات می‌باشد. ماکزیمم مصرف برق در تیرماه سال ۹۴ به ۵۰ هزار و ۱۷۸ مگاوات رسیده، در سال ۱۳۹۶ نیز پیک‌بار شبکه در تیرماه به ۵۵ هزار و ۳۶۶ مگاوات ثبت شده است. این میزان نشانگر رشد پنج درصدی مصرف برق است، که به تنهایی برابر با کل مصرف برق کشوری مثل ارمنستان با ۱۸۰۰ مگاوات مصرف و نزدیک به کشور آذربایجان با مصرفی بالغ بر ۳۸۰۰ مگاوات است. برای جبران این میزان رشد، سالانه می‌بایست حدود ۴۰۰۰ مگاوات نیروگاه جدید وارد مدار کرد، که خود به تنهایی حدود ۱۵ تا ۲۰ هزار میلیارد تومان هزینه به صنعت برق تحمیل می‌کند. در سایت تحقیقات و فناوری وزارت نیرو (۱۳۹۶) داشتن انرژی مناسب عمده‌ترین عامل اقتصادی جوامع صنعتی پس از نیروی انسانی است، چرا که انرژی یک نیاز اساسی برای استمرار توسعه اقتصادی، رفاه اجتماعی، بهبود کیفیت زندگی و امنیت جامعه است. اگر انرژی به نحوی تولید و مصرف شود که توسعه انسانی را در بلندمدت در تمام ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تامین

کند، مفهوم انرژی پایدار تحقق خواهد یافت. براین اساس می‌توان گفت تامین انرژی پایدار ضرورت توسعه پایدار است.

در سال‌های اخیر کشورهای مختلف پیشرفته و در حال توسعه و بخصوص کشورمان توجه فزاینده‌ای به انرژی تجدیدپذیر (فتوولتائیک)، جهت ایجاد تنوع در استفاده از منابع انرژی و کاهش وابستگی به یک حامل انرژی و ملاحظات زیست‌محیطی برای دستیابی به انرژی پایدار معطوف داشته‌اند. کاربرد استفاده از طرح‌های فتوولتائیک در ساختار شبکه برق ایران به علت تشویق و اطلاع‌رسانی نامناسب به متقاضیان، معماری ساختمان‌ها، هزینه اولیه احداث آن و عدم دریافت هزینه واقعی انرژی برق تولیدی از مشترکین توسط شرکت‌های توزیع برق، مورد توجه واقع نشده است. با افزایش رشد مصرف بخصوص افزایش پیک‌بار شبکه و تحمیل خاموشی‌های با برنامه به مشترکین، در سال‌های اخیر وزارت نیرو انرژی‌های تجدیدپذیر بخصوص انرژی‌های خورشیدی (فتوولتائیک) را در مراکز مصرف توزیع برق در اولویت برنامه‌های تحقیق و توسعه خود به منظور پایداری و افزایش قابلیت شبکه قرار داده است. انرژی تولیدی سیستم‌های فتوولتائیک در یک مجموعه توسعه یافته در یک بازه زمانی به فضای نصب، آب و هوا، زاویه تابش خورشید، زاویه نصب پنل نسبت به سطح افق زمین و پارامترهای اقتصادی بستگی دارد. این انرژی به علت دارا بودن توان بالا و در دسترس بودن، یک راه حل مناسب برای تامین انرژی و سرمایه‌گذاری اقتصادی در پخش توزیع برق می‌باشد. این نوع سیستم به دو شکل متصل و منفصل از شبکه توزیع و با ذخیره‌کننده انرژی و بدون آن طراحی می‌شود. مدل اقتصادی که بتواند برگشت سرمایه‌گذاری متقاضیان این سیستم‌ها را در کمترین زمان ممکن ایجاد کند، موجب توسعه آن، کاهش گازهای گلخانه‌ای، پایداری و آزادسازی ظرفیت شبکه توزیع برق، افزایش درآمد حاصل از سرمایه‌گذاری خواهد شد.

ایران در عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۵ درجه شمالی، از جمله مناطق مناسب از نظر تابش خورشید است. شدت تابش خورشید در شهرهای ایران در طول یک دوره زمانی، رابطه مستقیم با ساعات آفتابی، دمای هوا، درصد رطوبت نسبی و ارتفاع از سطح دریا دارد، که این پارامترها در ایستگاه‌های هواشناسی سازمان هواشناسی ثبت می‌شود. با استفاده از داده‌های ثبت شده، می‌توان شهرهای کشور را براساس میانگین ساعات آفتابی سالانه

طبقه‌بندی نمود. متوسط شدت تابش هر شهر از روابط ریاضی که در معادله (۱) نشان داده شده، بدست آمده است (دافی<sup>۱</sup>، ۱۹۹۱).

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{SG}}{\pi} (1 + 0/33 \times \cos \frac{3600 \times n}{365}) \times [\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \times \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta] \quad (1)$$

$H_0$  میانگین تابش کل روزانه در هر ماه و  $G_{SG}$  ثابت تشعشعی خارج جو که برابر با ۱۳۷۳ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است.  $\phi$  عرض جغرافیایی،  $\delta$  زاویه تابش خورشید نسبت به خط استوا بر حسب درجه،  $\omega_s$  زاویه ساعت خورشیدی بر حسب درجه،  $n$  میانگین ماهیانه ساعات آفتابی،  $N$  میانگین ماکزیمم ساعات آفتابی است. مقادیر زوایای تابش، ساعت خورشیدی و ماکزیمم ساعات آفتابی از روابط (۲)، (۳) و (۴) بدست آمده است.

$$\delta = 23/45 \sin \left( 360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (2)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3)$$

$$N = \frac{2}{15} \omega_s \quad (4)$$

در حالت بهینه از مدل ایزوتروپیک جهت بدست آوردن شدت تابش که در رابطه (۵) آورده شده، در حالتی که سایه بر روی پنل قرار ندارد، استفاده شده است. در شکل (۱) زوایای تابش خورشید بر سطح پنل نشان داده شده است.

$$H_T = H_B R_B + H_D \left( \frac{1+\cos \beta}{2} \right) + H \rho_g \left( \frac{1-\cos \beta}{2} \right) \quad (5)$$

$H_T$ : شدت تابش کل بر حسب (کیلووات ساعت بر متر مربع).

$R_B$ : ضریب، که نسبت مقدار تابش روی سطح شیب‌دار به سطح افق می‌باشد و از رابطه (۶) بدست می‌آید.

$\beta$ : زاویه پنل نسبت به سطح افق (درجه).

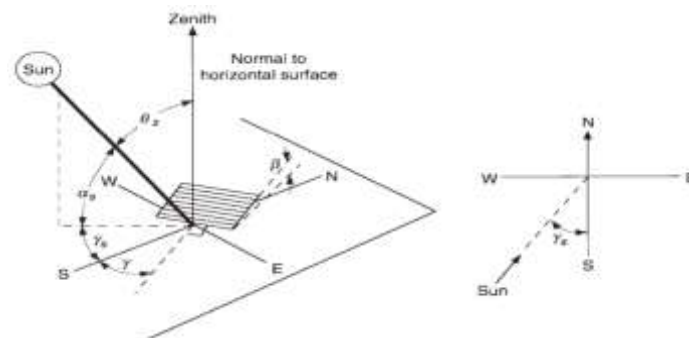
$H_D$ : شدت تابش پراکنده که وابسته به شرایط جوی ابرناکی دارد (کیلووات ساعت بر متر مربع).

<sup>1</sup> Duffie

$H_B$ : شدت تابش مستقیم (کیلووات ساعت بر متر مربع).

$$R_B = \frac{\cos\delta \cos(\phi-\beta)\omega'_s + (\pi/180)\omega'_s \sin(\phi-\beta)\sin\delta}{\cos\delta \cos\phi \sin\omega_s + (\pi/180)\omega_s \sin\phi \sin\delta} \quad (۶)$$

$$\omega'_s = \left[ \begin{array}{l} \min [\cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta)] \\ \cos^{-1}(-\tan(\phi-\beta)\tan\delta) \end{array} \right] \quad (۷)$$



شکل (۱): زاویه زینت، شیب، زاویه سطح آزیموت و زاویه آزیموت خورشید برای سطح شیب دار و همچنین نمای پلان زاویه آزیموت نشان داده شده است

منبع: دافی (۱۹۹۱)

از سویی تولید انرژی رابطه مستقیم به تعداد پنل‌های نصب شده و شدت تابش دارد. هرچه تعداد پنل‌ها در مساحت نصب یک سیستم فتوولتائیک بیشتر و اثر سایه بر روی هر پنل کمتر و زاویه پنل طوری تنظیم شود، که بیشترین تابش خورشید را جذب کند، انرژی تولیدی افزایش خواهد یافت. برای تحقق آن، تابع هدف از کمینه کردن فضای نصب به منظور ماکزیمم کردن تولید انرژی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبور عسل در نظر گرفته شده است و قیود آن شامل، توان تولید انرژی، تقاضا و مصرف انرژی، زاویه نصب پنل، شدت تابش خورشید و اثر سایه می‌باشد. در رابطه (۸)،  $S$  مساحت فضای نصب پنل‌ها بر حسب مترمربع در ابعاد طول ( $l$ ) و عرض ( $w$ ) بعنوان تابع هدف و در رابطه (۹)،  $E_p$  انرژی تولیدی پنل بر حسب کیلووات ساعت،  $H$  شدت تابش بر حسب کیلووات ساعت بر مترمربع،  $\eta_{sys}$  راندمان سیستم و  $r$  بر حسب سال می‌باشد. با بهینه نمودن  $S$  و  $H$ ، انرژی تولیدی ماکزیمم خواهد شد.

$$\text{Minimizaz: } S = l * w \quad (۸)$$

$$E_p = H \times S \times \eta_{sys} \times r \quad (۹)$$



ارزیابی اقتصادی به ارزش فعلی<sup>۱</sup>، نرخ بازده داخلی<sup>۲</sup>، دوره بازگشت سرمایه تنزیل<sup>۳</sup>، و شاخص سودآوری<sup>۴</sup> وابسته است. همچنین معیار اقتصادی بودن یک سیستم را می‌توان از خالص ارزش فعلی سیستم تجزیه و تحلیل نمود. NPV خالص مجموع ارزش خالص دریافت‌ها و پرداخت‌ها در محاسبه جریان نقدی در طول زمان بهره برداری از سیستم می‌باشد (احمدی<sup>۵</sup>، ۱۳۹۳).

$$NPV = \sum_{r=0}^n \frac{CF_r}{(1+i)^r} = CF_0 + \frac{CF_1}{(1+i)^1} + \dots + \frac{CF_n}{(1+i)^n} \quad (10)$$

CF سرمایه‌گذاری اولیه و  $CF_r$  برابر وجه نقد دریافتی و یا پرداختی در زمان  $t$ ،  $i$  برابر نرخ تنزیل یا بهره است، در این رابطه پارامترهای اقتصادی مانند نرخ تورم و نرخ استهلاک جهت اقتصادی بودن یک سیستم تأثیرپذیراست. سیستم‌هایی صرفه اقتصادی دارند که نرخ بازده داخلی آنها از نرخ تنزیل مورد انتظار سرمایه‌گذاران بیشتر باشد. در رابطه (۱۱)، IRR نرخ بازده داخلی است.

$$\sum_{r=0}^n \frac{CF_r}{(1+IRR)^r} = 0 \quad (11)$$

دوره بازگشت سرمایه تنزیل برابر است بامدت زمانی که طول می‌کشد تا مجموع ارزش حال دریافت‌های سیستم بتواند سرمایه‌گذاری را پوشش دهد. شاخص سودآوری برابر ارزش فعلی مجموع جریان نقدی آتی، تقسیم بر سرمایه‌گذاری اولیه، هنگامی که یک سیستم صرفه اقتصادی دارد، که سودآوری بزرگتر از یک باشد. در رابطه (۱۱)، سودآوری با PI نشان داده شده است.

$$PI = \frac{PV \text{ OF Future Cash Flow}}{\text{Initial Investment}} = 1 + \frac{NPV}{\text{Initial Investment}} \quad (12)$$

با توجه به مفهوم ارزش فعلی و الگوریتم فراابتکاری کلونی زنبورعسل در ماکزیمم نمودن انرژی تولیدی سیستم در این پژوهش، آنالیزو مدل اقتصادی براساس درآمد حاصل از فروش انرژی تولیدی به هزینه‌ها در طول دوره بهره‌برداری سیستم بدست آمده است. میزان درآمد حاصل از فروش انرژی رابطه مستقیم به ماکزیمم تولید انرژی دارد.

<sup>1</sup> Net Present Value

<sup>2</sup> Internal Rate of Return

<sup>3</sup> Discouted Payback Period

<sup>4</sup> Profitability Index

<sup>5</sup> Ahmadi (2015)

قیمت فروش انرژی تولیدی حاصل از سیستم، به مراتب از هزینه انرژی تولیدی شبکه توزیع قیمت بالاتری دارد، که مشترکین تمایل به فروش انرژی تولیدی به شرکت‌های توزیع دارند. اگر قیمت انرژی تولیدی سیستم و شبکه توزیع اختلاف کمی داشته باشد، در این حالت مشترک سعی به کاهش مصرف و فروش انرژی را به شرکت‌های توزیع خواهند داشت. مجموع هزینه‌های سیستم عبارتند از،  $ISC$  سرمایه‌گذاری اولیه،  $ERC_r$  هزینه جایگزینی قطعات سیستم شامل انرژی ذخیره‌کننده و اینورتر،  $SMC(r)$  هزینه سرویس و نگهداری،  $CES_k$  هزینه شارژ و دشارژ می‌باشد. به‌جز هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌ها، به پارامترهای اقتصادی مانند نرخ استهلاک، نرخ تورم، نرخ تنزیل یا بهره سالیانه و پایداری شبکه توزیع برق در طول بهره‌برداری سیستم وابسته است. مقدار سوددهی در این پژوهش از نسبت درآمد به هزینه‌ها در طول دوره عمر سیستم و بازگشت سرمایه در کمترین زمان وابسته است، در صورتی  $PI$  بزرگتر از صفر باشد و زمان بازگشت سرمایه در کمترین زمان بدست آمده باشد، سیستم اقتصادی است. پارامترهای تاثیرپذیر فنی و اقتصادی معادلات در این پژوهش ارائه شده است.

$$PI = \sum_r^n \frac{ESR_{PV}(r)}{ISC + ERC_r + SMC(r) + CES_k} \quad (13)$$

محققین در پژوهش‌های داخلی و خارجی بدنبال اقتصادی کردن ریزشکبه جریان مستقیم سیستم‌های فتوولتائیک و جایگزین نمودن انرژی تولیدی آن بجای انرژی سوخت‌های فسیلی می‌باشند. تحقیقات پژوهشگران در حال حاضر در ریزشکبه‌ها به صورت مطالعات موردی بوده است.

آند و همکاران در موسسه فناوری کشور هند (۲۰۰۹) محتوای انرژی خورشیدی را بررسی نموده‌اند. مطالعات در خصوص تولید انرژی‌های خورشیدی در کشورهای اروپایی بخصوص آلمان و دیگر کشورها مانند چین، ایالت متحده آمریکا، اروگوئه و سوئد در بخش تولید و توزیع صورت پذیرفته است. ولی در کشورهای در حال توسعه بخصوص کشور ما، تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، بخصوص استفاده از انرژی خورشیدی پیشرفت خوبی نداشته است. در پژوهش بررسی ساختار ذخیره‌سازی و تولید انرژی خورشیدی و راهبرد کشورها، مانند نقشه راه ژاپن، توسعه انرژی خورشیدی (فتوولتائیک) با قیمت رقابتی تا سال ۲۰۳۰، به بررسی چندگانه استفاده از انرژی خورشیدی در آینده، با توجه به نگرش کاهش هزینه‌ها و افزایش تکنولوژی پرداخته شده است. در این تحقیق‌ها هیچ

کدام از محققین ادعا نمی‌نمایند که فوراً "انرژی‌های نو جایگزین انرژی‌های فسیلی می‌شود."

در بخش انرژی ایالات متحده (۲۰۱۵) به مروری بر تکنولوژی پیشرفته فناوری انرژی پاک، برای پایداری و افزایش قابلیت اطمینان صادرات انرژی، اقتصادی نمودن صنعت توزیع برق، پژوهش‌ها و تحقیقاتی در داخل و خارج کشور پرداخته است. همچنین سهم انرژی خورشیدی در ایالت متحده و تولید برق سالانه را ارزیابی نموده، در این تحقیق آمده که از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵، حدود ۵۰٪ از هزینه‌های تولید انرژی خورشیدی کاسته شده است. پروژه‌های تحقیق و توسعه شامل برنامه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت در جهت کاهش هزینه‌ها، افزایش تولید و ساختار و تکنولوژی انرژی خورشید در صنعت برق ایالات متحده قرار داده شده است.

هاتفی و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۱۷) به مدیریت توان از چند منبع انرژی تجدیدپذیر ترکیبی (خورشید، باد و باتری) پرداخته است.

فینا و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۸) به ارزیابی اقتصادی و مدل‌های تجاری سیستم فتوولتائیک ساختمان‌های چند طبقه در اتریش و آلمان پرداخته است. هزینه‌های مربوط به سوخت‌های فسیلی، انرژی تولیدی و میزان سودآوری محاسبه شده است.

زسی‌بوراک و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۱۹) تجزیه و تحلیل اقتصادی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه برق در مجارستان درخصوص نحوه سرمایه‌گذاری، بازپرداخت، هزینه‌های نصب سیستم، مساعدت دولت و عرضه و تقاضای انرژی را ارائه داده است.

مولالم و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۷) به طراحی ریزشبکه ترکیبی بادی و خورشیدی منفصل از شبکه جهت ایستگاه‌های موبایل و برآورد اقتصادی هزینه برق مصرفی فسیلی و تجدیدپذیر در محل‌های فاقد شبکه برق در ارومیه پرداخته است.

رایت و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۸) هزینه‌های انرژی مصرفی فسیلی و تولیدی سیستم فتوولتائیک، تعرفه‌های برق، هزینه‌های نصب و سرمایه‌گذاری در جنوب‌غربی آمریکا را تجزیه و تحلیل نموده‌اند.

<sup>1</sup> Hatefi et al.

<sup>2</sup> Fina et al.

<sup>3</sup> Zsiborács

<sup>4</sup> Muluallem et al.

<sup>5</sup> Wright et al.

ستاره و قاسمی<sup>۱</sup> (۱۳۹۴) به کمینه کردن هزینه بهره‌برداری در حین تغییرات بار مصرفی و عرضه و تقاضای انرژی در ریزشبکه‌های جریان مستقیم پرداخته‌اند. مولائی و همکاران (۱۳۹۴) به تئوری بنگاه‌ها، که یک بنگاه تولیدی می‌تواند به دنبال حداکثر سود یا حداکثر کردن تولید با مقدار مشخص هزینه یا حداقل کردن هزینه با مقدار مشخصی تولید باشد، پس مقدار تقاضا برای حامل‌های انرژی به عنوان نهاد تولیدی می‌تواند تابعی از قیمت نهاد، قیمت سایر نهادها و مقدار تولید محصول باشد.

صادقی و همکاران (۱۳۹۴) بهینه کردن تامین منابع انرژی در تولید برق از نیروگاه‌های سیکل ترکیبی، بخار، گاز و خورشیدی و کاهش آلودگی‌ها را بررسی کرده‌اند. موسوی و عسگریان<sup>۲</sup> (۱۳۹۶) به یک روش برای ارزش‌گذاری برق در شبکه‌های توزیع با استفاده از تولیدات پراکنده DG ارائه داده است. در این مقاله ارزش‌گذاری برق به صورت قیمت حاشیه‌ای محلی LMP در شین‌های متصل به تولیدات پراکنده مدل شده است.

قلی‌نیا و همکاران<sup>۳</sup> (۱۳۹۷) به برنامه‌ریزی بهینه اقتصادی در حوزه کوتاه‌مدت ریزشبکه در دو سطح با افق‌های متفاوت کوتاه جهت مبادله انرژی میان مشترکین و بهره‌بردار و پاسخ‌گویی بار را ارائه داده‌اند.

امیری و همکاران<sup>۴</sup> (۱۳۹۸) نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر و قیمت برق و مبادله زنجیره انرژی ریزشبکه‌ها را نشان داده‌اند.

در جدول (۱) خلاصه پیشینه مقالات داخلی و خارجی آمده است. اکثر مقالات ارائه شده، با استفاده از نرم افزار متلب، GAMS و HOMER شبیه‌سازی شده است. در این پژوهش استفاده از الگوریتم فرابتنکاری کلونی زنبور عسل، طرحی نوین جهت کمینه کردن زمان بازگشت سرمایه نصب سیستم فتوولتائیک و با نگرش علوم انسانی می باشد.

<sup>1</sup> Setare & GHasemi (2016)

<sup>2</sup> Mosavi & Asgarian (2018)

<sup>3</sup> GHolinia et al. (2019)

<sup>4</sup> Amiri et al. (2020)

## جدول (۱): خلاصه پیشینه مقالات داخلی و خارجی

ردیف	موضوع	نام محقق	مدل	تاریخ انتشار
۱	تحقیق در مورد انرژی خورشیدی (نیروگاه) در مؤسسه فناوری کانپور در هند	آنند و همکاران	---	۲۰۰۹
۲	تاثیر شرایط آب و هوایی بر شبکه توزیع برق ایالت کالیفرنیا	کوهن و همکاران	----	۲۰۱۵
۳	مدیریت قدرت در یک شبکه میکرو متصل به برق با چندین منبع انرژی تجدیدپذیر	هاتفی و همکاران	شبیه‌سازی/ متلب	۲۰۱۷
۴	طراحی سیستم برق ترکیبی / بادی ترکیبی خارج از شبکه برای موبایل از راه دور، مطالعه موردی	مولالم و همکاران	HOMER	۲۰۱۷
۵	هزینه ردیابی میکروسیستم فتوولتائیک با هزینه رقابتی با تغییرات بار	رایت و همکاران	شبیه‌سازی/ متلب	۲۰۱۸
۶	ارزیابی اقتصادی و مدل های تجاری از سیستم های فتوولتائیک پشت بام در ساختمان‌های چند طبقه: مطالعات موردی برای اتریش و آلمان	فینا و همکاران	شبیه‌سازی/ متلب	۲۰۱۸
۷	تحلیل اقتصادی سیستم PV متصل به شبکه مقررات: یک مطالعه موردی مجارستانی	زسی‌بوراک	شبیه‌سازی/ متلب	۲۰۱۹
۸	مدیریت توان در ریزشبکه متعادل جزیره‌ای با در نظر گرفتن پایداری سیگنال کوچک و پاسخ دینامیکی	ستاره و قاسمی	شبیه‌سازی در متلب GAMZ	۱۳۹۴
۹	بهینه‌یابی تامین منابع انرژی با هدف تولید برق: چشم‌انداز ایران در افق ۱۴۰۴	صادقی و همکاران	برتسیمس و سیم	۱۳۹۴
۱۰	رابطه بین مصرف انرژی و رشد تولید در بنگاه‌های بزرگ تولیدکننده وسایل حمل و نقل ایران (رهیافت علیت گرنجر، تودا و یاماماتو و داده‌های تابلویی پویا	مولایی و حسین‌زاده	مدل اقتصادسنجی از رویکرد داده‌های تابلویی پویا	۱۳۹۴
۱۱	قیمت‌گذاری برق در شبکه‌های توزیع با هدف	موسوی و	-----	۱۳۹۶

		عسگریان	کاهش تلفات و آلودگی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات خودتطبیقی	
۱۳۹۷	شبیه‌سازی / متلب	قلی‌نیا و همکاران	طرح روشی نوین در برنامه‌ریزی بهینه کوتاه-مدت ریزش شبکه	۱۲
۱۳۹۸	پخش بار	امیری و همکاران	بهره‌برداری چندریزش شبکه با حامل‌های انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت مختلف	۱۳

منبع: یافته‌های تحقیق

### ۳- روش‌شناسی تحقیق

در حال حاضر نگاه صنعت برق ایران به نصب ریزش‌بکه جریان مستقیم سیستم فتوولتائیک، نگاهی اقتصادی، افزایش ظرفیت انرژی شبکه برق و پایداری آن می‌باشد. هرچند که کاهش گازهای گلخانه‌ای نیز از مزایای دیگر این نگرش است. در کشورهای پیشرفته و توسعه یافته برخلاف صنعت برق ایران، به علت نزدیکی قیمت انرژی برق شهری و انرژی تولیدی سیستم فتوولتائیک، مشترکین به دنبال استفاده و تامین برق ساختمان از طریق این سیستم‌ها می‌باشند. در طول یک سال پژوهش از متخصصین توزیع صنعت برق ایران، قراردادهای منعقد در شرکت‌های توزیع برق، مطالعات کتابخانه‌ای و بازدیدهای میدانی، پارامترهای اقتصادی و فنی تجزیه و تحلیل و عملکرد ثبت انرژی ریزش‌بکه‌ها، پیشینه پژوهش‌های داخل و خارج کشور، داده‌های هواشناسی، استخراج و در مدل اقتصادی بکار گرفته شده است. پارامترهایی مانند ابرناکی، دما و رطوبت کمترین تاثیر را در محاسبات شدت تابش هر شهر داشت، که در مدل رگرسیونی آن صرف نظر و فقط متوسط ساعات آفتابی هر شهر در نرم افزار SPSS محاسبه شده، همچنین تاثیر سایه، فاصله هر پنل از هم، زاویه تابش و دیگر پارامترها در شبیه‌سازی جهت افزایش ماکزیمم انرژی و بیشترین درآمد حاصل از فروش انرژی مد-نظر قرار گرفته است. با استفاده از مدل ریاضی ارائه شده، ماکزیمم درآمد حاصل از تولید انرژی هر شهر و هزینه‌های آن، آنالیز شده است. در این مدل افزایش و کاهش نرخ تعدیل به علت تغییرات نرخ ارز و تورم، نرخ فروش انرژی و انرژی تولیدی هر شهر و درآمد حاصل از اتصال سیستم به شبکه توزیع و همچنین هزینه انرژی ذخیره شده (باطری) و میزان سرمایه‌گذاری اولیه به صورت نقدی و یا وام آورده شده، سپس خالص ارزش فعلی درآمد حاصل از فروش انرژی، دوره برگشت سرمایه و میزان درآمد حاصل از سرمایه‌گذاری در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و ارزیابی شده است. به عبارت دیگر متوسط

سرمایه‌گذاری اولیه نصب سیستم به صورت نقدی و یا نقدی به همراه کمک‌های دولت و با بررسی قراردادهای منعقد شده شرکت‌های توزیع برق و قیمت‌گذاری روز بازار، برآورد شده است. دوره برگشت سرمایه با نرخ خرید انرژی تولیدی شرکت‌های توزیع برق، در حالت نرمال و بهینه و با رویکرد سیستم بدون ذخیره‌کننده و یا با ذخیره‌کننده انرژی (باطری) آنالیز شده است. در این پژوهش جامعه آماری کلیه شرکت‌های توزیع ایران می‌باشد و مدل اقتصادی براساس نگرش تعییرات بار شبکه و سیستم فتوولتائیک توامان توسط مشترک و شرکت‌های توزیع برق ایران مدنظر قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که مدل ریاضی ارائه شده، جهت سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه توزیع در دو حالت، با ذخیره‌کننده انرژی و بدون آن، برای اکثر شهرهای ایران اقتصادی ولی بازگشت سرمایه در هر طبقه‌بندی متفاوت می‌باشد. بهترین حالت سرمایه‌گذاری در سیستم فتوولتائیک بدون ذخیره‌کننده انرژی با متصل به شبکه توزیع است.

#### ۴- آنالیز اقتصادی

اقتصادی کردن هزینه‌های نصب ریزشبکه جریان مستقیم سیستم فتوولتائیک و برگشت سرمایه در کمترین زمان، موجب تشویق سرمایه‌گذاران و مشترکین خواهد شد. یکی از فرآیندها و روش‌ها، چرخه هزینه عمر می‌باشد، که تمام هزینه‌ها را درآینده و حال در نظر می‌گیرد. بدین منظور که تمام روابط ریاضی ارائه شده هزینه‌ها به ارزش فعلی، ارزش‌گذاری شده است.

در این پژوهش، هزینه‌ها، درآمد حاصل از فروش انرژی تولیدی و بهینه نمودن فضای نصب پنل‌ها بمنظور ماکزیمم نمودن تولید انرژی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری زنبورعسل در نرم افزار Matlab شبیه‌سازی شده است. قیمت تجهیزات سیستم براساس مستندات شرکت‌های نصب سیستم فتوولتائیک به مشترکین در شرکت توزیع برق تهران بزرگ در سال ۹۷، ۹۸ و ۹۹ بدون ذخیره‌کننده انرژی (باطری) و همچنین برندهای متفاوت موجود در بازار لحاظ شده، که هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بدون ذخیره‌کننده انرژی با نرخ تورم بانک مرکزی و به ازای هر وات حدود یک تا یک‌و‌دو‌دهم دلار برآورد شده است. هر چند این هزینه‌ها برای کیلووات‌های بیشتر، کاهش می‌یابد. هزینه‌های ذخیره‌کننده انرژی و جایگزینی قطعات و همچنین سرویس و نگهداری جداگانه و براساس سرمایه‌گذاری اولیه، نرخ تورم و بهره وام براساس برآورد بانک مرکزی

در شبیه‌سازی لحاظ شده است. همچنین نرخ تعدیل در صورت تغییرات تورم سالیانه در مدل پیش‌بینی شده است. در صورت افزایش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه به ازای یک کیلووات تولید انرژی سیستم، به علت تحریم و بحران‌های بیولوژیکی جهانی، کاهش شدید ارزش پول کشور و یا افزایش تورم نامتعارف، سیاست‌گذاری دولت دادن وام و یا افزایش قیمت خرید انرژی تولیدی سیستم می‌باشد. این در حالی اتفاق خواهد افتاد که سوبسید انرژی برق مصرفی حذف نشده باشد. به عبارت دیگر در صورتی که نرخ قیمت انرژی برق مصرفی شبکه توزیع برق واقعی شده باشد، مدل ریاضی ارائه شده، اقتصادی و برگشت سرمایه دارای شیب افزایشی است. در این پژوهش تاثیر پایداری شبکه توزیع برق و حساسیت مشترک به خاموشی‌ها در میزان هزینه ذخیره‌کننده انرژی و سرعت برگشت سرمایه تاثیر زیادی خواهد داشت.

#### ۴-۱- طبقه‌بندی شهرهای مورد مطالعه

طبقه‌بندی داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی مراکز استان‌های ایران براساس متوسط ابرناکی، رطوبت، دما و ساعات آفتابی سالیانه در جدول (۲) و مدل رگرسیونی شدت تابش هرناحیه در جدول (۳) آورده شده است.

#### جدول (۲): طبقه‌بندی مراکز شهرهای مورد مطالعه استان‌ها و شهرهای ایران

ردیف	ناحیه اول	ناحیه دوم	ناحیه	ناحیه	متوسط ساعات آفتابی سالیانه
۱	اصفهان	اهواز	اردبیل	رشت	ناحیه اول: ۳۲۰۰-۳۴۰۰
۲	بیرجند	ایلام	تبریز	ساری	ناحیه دوم: ۳۰۰۰-۳۲۰۰
۳	زاهدان	بندرعباس	ارومیه	گرگان	
۴	شیراز	بوشهر	زنجان	رامسر	ناحیه سوم: ۲۱۰۰-۳۰۰۰
۵	کرمان*	تهران	بجنورد		
۶	یزد	خرم‌آباد	مشهد		ناحیه چهارم: کمتر از ۲۱۰۰
۷		سمنان	اراک		
۸		شهرکرد	سنندج		
۹		قم	قزوین		
۱۰		یاسوج	کرج		
۱۱		آبادان	کرمانشاه		

منبع: برزی و همکاران (۱۳۹۸)

#### جدول (۳): مدل رگرسیونی شدت تابش و ساعات آفتابی نواحی مختلف

مدل رگرسیونی	شهر	ردیف
$\frac{H}{H_0} = 0.203 + 0.535 \frac{n}{N}$	اهواز و تهران	۱



$\frac{H}{H.} = 0.094 + 0.653 \frac{n}{N}$	یزد	۲
$\frac{H}{H.} = 0.039 + 0.782 \frac{n}{N}$	گرگان	۳
$\frac{H}{H.} = -0.069 + 0.985 \frac{n}{N}$	اردبیل	۴

منبع: برزی و همکاران (۱۳۹۸)

## ۲-۴- درآمد حاصل از فروش انرژی

میزان درآمد حاصل از تولید انرژی رابطه مستقیم به تعداد پنل‌های نصب شده و شدت تابش دارد که در رابطه (۱۴) آمده است. قیمت فروش انرژی تولیدی حاصل از سیستم، به مراتب از هزینه انرژی تولیدی شبکه توزیع قیمت بالاتری دارد، که مشترکین تمایل به فروش انرژی تولیدی سیستم به شرکت‌های توزیع دارند. همچنین اگر قیمت انرژی تولیدی سیستم و شبکه توزیع اختلاف کمی داشته باشد، در این حالت مشترک سعی به کاهش مصرف و فروش انرژی را به شرکت‌های توزیع خواهند داشت. زمان تولید انرژی سیستم طبق جدول (۲) و (۳) وابسته به ساعات آفتابی و شدت تابش هر شهر است. درآمد حاصل از فروش انرژی ( $RES^1 < 0$ ) از حاصل ضرب مقدار انرژی تولیدی ( $E_p^2 < 0$ )، قیمت فروش انرژی (C) و نرخ تعدیل سالیانه حاصل از فروش انرژی ( $AR_p^3 < 0$ )، برای سال‌های آتی بعلاوه انرژی تولیدی در قیمت اتصال به شبکه توزیع  $c_1 < 0$ ، که از رابطه (۱۵) برآورد و بدست می‌آید. متغیر نرخ تعدیل توسط وزارت نیرو، براساس رشد قیمت ارز و نرخ تورم بانک مرکزی هدف‌گذاری می‌شود. همچنین می‌توان میزان متغیر نرخ تعدیل را به عنوان سیاست‌گذاری فروش انرژی و براساس شرایط روز بازار و براساس نرخ تورم، قرارداد تا بنگاه‌های اقتصادی و مشترکین برق به نصب سیستم‌های فتوولتائیک تشویق شوند. جدول (۴) قیمت خریداری شده انرژی تولیدی را در شرکت‌های توزیع نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Revenue from energy sales

<sup>2</sup> Energy prices

<sup>3</sup> Adjustment rate

$$E_p = H \times S \times \eta_{sys} \times \quad (14)$$

$$ESR_{PV}(r) = E_p(C \times AR_r + C_1) \quad (15)$$

جدول (۴): قیمت خریداری شده انرژی تولیدی مصوب

مقدار توان نصب (کیلووات)	قیمت انرژی تولیدی به ازای یک کیلووات ساعت (ریال)
۱-20	۱۰۴۰۰
20-100	۹۱۰۰
100-10000	۷۴۱۰

منبع: داده‌های وزارت نیرو و شرکت‌های تابعه آن

### ۳-۴- ارزش فعلی درآمد

در اکثر کشورها کنترل تورم یکی از اساسی‌ترین پارامترهای اقتصادی تلقی می‌شود، ولی امکان کنترل کامل آن امکان‌پذیر نمی‌باشد. در کشورمان ایران نیز این امر مستثنی نمی‌باشد. به‌طوریکه در چند سال گذشته به علت تحریم، نرخ تورم به شکل نوسانی بوده و این باعث تاثیر در هزینه‌های نصب سیستم فتوولتائیک و کاهش ارزش پول شده است. درآمد حاصل از فروش انرژی ( $ESR_{PV} < 0$ ) با توجه به تورم<sup>۱</sup> سال‌های آتی، متفاوت می‌باشد و ارزش آن به تورم وابسته است. در این پژوهش نرخ رسمی آن توسط بانک مرکزی برآورد شده است. در رابطه (۱۶)، درصد نرخ تورم سالیانه بر ارزش درآمد حاصل از فروش انرژی سال‌های آتی ( $ESR_{PV} < 0$ ) با ز نشان داده شده است. این رابطه نشان می‌دهد ارزش درآمد سالیانه حاصل از فروش انرژی، با نرخ تورم ارزش فعلی خود را در هر سال، ازدست می‌دهد. با تغییر نرخ تعدیل سالیانه ( $AR_r < 0$ ) در رابطه (۱۴)، تغییرات نرخ تورم قابل کنترل است.

$$ESR_{PV}(r) = \sum_{r=1}^n \frac{ESR_{PV}(r)}{(1+j)^r} \quad (16)$$

### ۴-۴- مجموع هزینه‌های سیستم

هزینه نصب یک سیستم فتوولتائیک به سرمایه‌گذاری اولیه شامل هزینه‌های پنل، استراکچر، باطری، اینورتر و هزینه‌های آن در طول بهره‌برداری به جایگزینی تجهیزات، شارژ و دشارژ باطری (ذخیره‌کننده انرژی)، سرویس و نگهداری و همچنین تاثیر پارامترهای اقتصادی مانند تورم بستگی دارد.

<sup>1</sup> Inflation

<sup>2</sup> Adjustment rate

## ۴-۴-۱- سرمایه‌گذاری اولیه

در حال حاضر ریز شبکه جریان مستقیم سیستم فتوولتائیک که توسط بنگاه‌های اقتصادی و یا مشترکین درایران نصب می‌گردد، به نحوه سرمایه‌گذاری، آزادسازی ظرفیت انرژی و پایداری شبکه توزیع صنعت برق بستگی دارد، ولی در دیگر کشورها، بجز موارد مطرح شده، مزیت به حداقل رساندن خاموشی برق برای مشترکین را دارد. اختلاف سرمایه‌گذاری در سیستم‌های فتوولتائیک به ذخیره‌کننده انرژی در سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های آتی آن وابسته است، که به پایداری شبکه توزیع نیز مرتبط است.

رابطه (۱۷) سرمایه‌گذاری اولیه ( $ISC^1$ ) برای نصب یک سیستم فتوولتائیک نشان داده شده است. سرمایه‌گذاری اولیه می‌تواند نقدی ( $CC$ )، یا توامان به صورت نقدی و وام  $L(r_n, n)$  تامین شود. در رابطه (۱۷)،  $s$  بهره وام،  $r_n$  تعداد اقساط برحسب ماه می‌باشد.

$$ISC = CC + \sum L(r_n, s) \quad (17)$$

در رابطه (۱۸) اصل وام و کسر بهره آن نشان داده شده است، در این رابطه  $r$  تعداد سال می‌باشد.

$$L(r_n, s) = \frac{L \times \frac{s}{1200} (1 + \frac{s}{1200})^{r_n}}{(1 + \frac{s}{1200})^{r_n} - 1} \times 12 \times r \quad (18)$$

## ۴-۴-۲- انرژی ذخیره‌کننده و اینورتر

در سیستم فتوولتائیک منبع ذخیره‌کننده انرژی و بخشی از قطعات دیگر پس از دوره‌ای نیاز به تعویض دارند. عکس این دوره ( $Z_n$ ) و با در نظر گرفتن ارزش صفر در پایان دوره برای قطعه، نرخ استهلاک ( $\mu$ ) را نشان می‌دهد. عمر پستل حدود ۲۰ تا ۲۵ سال و قرارداد شرکت‌های توزیع صنعت برق با متقاضیان نصب سیستم فتوولتائیک در حال حاضر ۲۰ سال می‌باشد. ولی عمر مفید اینورتر و باتری کمتر از آن ( $URC_{Zn}$ )<sup>۲</sup> است. به همین منظور هزینه جایگزینی آنها ( $ERC_r < 0$ )<sup>۳</sup> در طول عمر سیستم آورده شده است. در این پژوهش برای دوره قرارداد ۲۰ سال، تعویض باتری چهار بار و اینورتر یک بار در شبیه‌سازی آمده است. مقدار سرمایه‌گذاری هزینه باتری به عنوان ذخیره‌کننده انرژی،

<sup>1</sup> Initial System Capital

<sup>2</sup> Unite Replacement Cost

<sup>3</sup> Equipment Replacement Cost

به شرائط پایداری شبکه توزیع برق و حساسیت مشترک به قطع برق بستگی دارد. جایگزینی قطعاتی مانند اینورتر نیز بهتر است یک بار در طول ۲۰ ساله قرارداد تعویض شود. روابط ریاضی (۱۹)، (۲۰)، (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) نرخ استهلاک و هزینه جایگزینی قطعات آورده شده است.  $Z_r$  درصدی از میزان سرمایه گذاری اولیه  $\bar{J}$  متوسط تورم سالیان قبل و  $F$  عمر سیستم به عمر مفید قطعات می باشد.

$$\mu = \frac{1}{z_n} \quad (19)$$

$$URC_{z_n} = z_r \times ISC \quad (20)$$

$$\bar{J} = \sum_{i=1}^{z_n} j_i \quad (21)$$

$$F = \frac{r}{z_n} \quad F \neq 1 \quad (22)$$

$$ERC_r = URC_{z_n} \times (1 + j)^{z_n} \times F \quad (23)$$

#### ۳-۴-۴-۴-۴ سرویس و نگهداری

یک سیستم جهت عملکرد مناسب نیاز به سرویس و نگهداری ( $SMC^1$ ) در طول عمر مفید خود دارد. که هزینه آن از رابطه (۲۴) بدست آمده است. در این رابطه  $z_r$  درصدی از سرمایه اولیه می باشد.

$$SMC(r) = z_r \times ISC \times (1 + j)^r \quad (24)$$

#### ۴-۴-۴-۴-۴ هزینه شارژ و دشارژ باتری

در ریزشکه جریان مستقیم سیستم فتوولتائیک که دارای ذخیره کننده انرژی می باشند. هزینه شارژ و دشارژ ذخیره کننده انرژی ( $CES^2$ ) در هر مرحله برابر است با مجموع هزینه شارژ ذخیره کننده ( $CSC^3$ ) به مجموع انرژی مانده در ذخیره کننده انرژی ( $SE^4$ ) می باشد که در رابطه (۲۵) نشان داده شده است.

$$CES_k = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} CSC_k}{\sum_{i=1}^{k-1} SEK} \quad (25)$$

متوسط هزینه انرژی در هر کیلووات ساعت ( $AEC^5$ ) برابر با نسبت کل هزینه سالانه ( $AEC^6$ ) به مجموع انرژی سالیانه ( $TEP^7$ ) در رابطه (۲۶) آمده است.

$$AEC = \frac{TAC(year)}{TEP(\frac{kwh}{year})} \quad (26)$$

<sup>1</sup> Service and Maintenance Cost

<sup>2</sup> Cost of Energy Storage

<sup>3</sup> Cost of Storage Charge

<sup>4</sup> Stored Energy

<sup>5</sup> Average Energy cost

<sup>6</sup> Total Annual cost

<sup>7</sup> Total energy produced

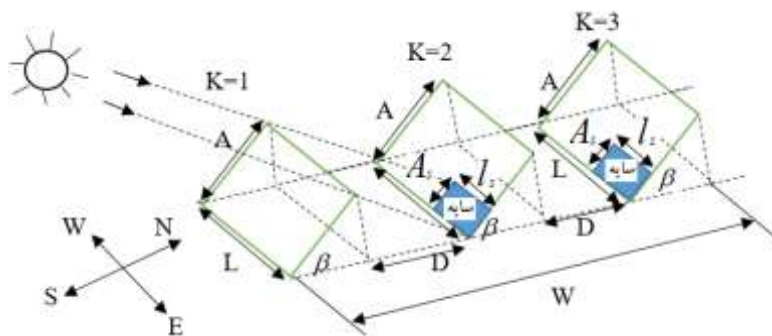
### ۵- شبیه‌سازی و ارائه مدل سیستم

ریزشبکه‌های جریان مستقیم فتوولتائیک را می‌توان نوعی از سیستم تخصیص انرژی بازار که متکی به مصرف‌کنندگان و تولیدکننده‌ها است را یک سیستم اقتصادی دانست که منابع در این سیستم تولید و برنامه‌ریزی می‌شود. در این مدل:

الف. از الگوریتم فراابتکاری زنبورعسل کلونی به منظور بهینه‌کردن فضای نصب سیستم فتوولتائیک شکل (۲) جهت ماکزیمم کردن انرژی تولیدی و با رعایت قیود رابطه (۲۷) استفاده شده، شکل (۳) نمودار نقاط بهینه محلی و سراسری شهراردبیل که با استفاده از الگوریتم کلونی زنبورعسل در نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی شده، نشان داده شده است.

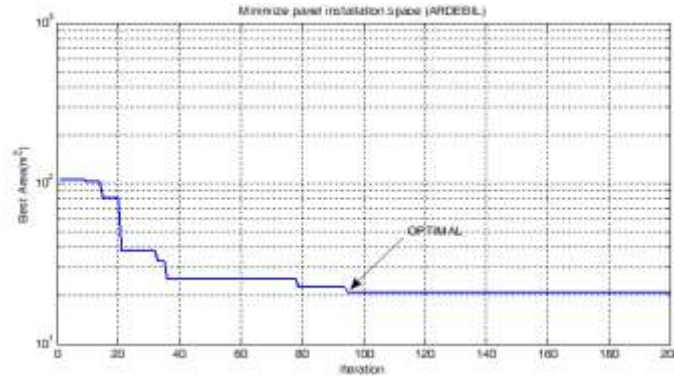
ب. به علت هزینه پایین برق مصرفی از شبکه توزیع، الویت تامین برق مصرف‌کننده از این شبکه بوده و انرژی تولیدی سیستم فتوولتائیک با قیمت‌گذاری مصوب به شبکه تزریق می‌شود.

$$\text{MINIMAZ: } S=l*w \left\{ \begin{array}{l} (k-1) \times D + k \times A \times \cos\beta \leq w \\ 0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ \\ A \leq A_{max} \\ E \leq E_{min} \\ S(l \times w) \times S_{max} \leq (l_{max} \times w_{max}) \\ \xi_1 \leq \frac{w}{l} \leq \xi_2 \\ D \geq D_{min} \end{array} \right. \quad (27)$$



شکل (۲): تاثیر اثر سایه بر پنل‌های ردیف (k-1)

منبع: یافته‌های تحقیق



شکل (۳): نقاط بهینه محلی و سراسری شهراردبیل

منبع: یافته‌های تحقیق

$$EM = \frac{\sum_{r=1}^n RES_{PV}(r)}{ISC + \sum_{r=1}^n ERC_r + \sum_{r=1}^n SMC_r + \sum_{i=1}^{k-1} CES_k} \quad (28)$$

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^r H \times S \times \eta_{sys} \times r_i \times (C \times AR_r \times c_1)}{[cc + \sum L(r_n, s)] + \sum_{i=1}^z n (URC_{zn} \times (1+j)^{zn} \times F) + \sum_{i=1}^r (z_r \times ISC \times (1+j)^r + \frac{\sum_{i=1}^{k-1} CSC_k}{\sum_{i=1}^{k-1} SE_k})} \quad (29)$$

رابطه (۲۸) مدل کلی اقتصادی و رابطه (۲۹) گستره آن را در حالت بهینه ریزش شبکه جریان مستقیم سیستم فتوولتائیک نشان داده شده است. در این مدل صورت کسر که درآمد حاصل از فروش انرژی ( $RES_{PV}$ ) به شرکت‌های توزیع برق است، با استفاده الگوریتم کلونی زنبور عسل در نرم‌افزار متلب براساس قیود رابطه (۲۷) بهینه و شبیه-سازی شده و نقاط بهینه محلی و سراسری فضای نصب سیستم در انرژی تولیدی استخراج شده است.

هرچه قابلیت اطمینان شبکه توزیع برق محل نصب سیستم فتوولتائیک پایدار باشد، هزینه ذخیره‌کننده انرژی (باتری) و هزینه شارژ و دشارژ آن از مخرج کسر رابطه (۲۹) حذف و رابطه (۳۰) به عنوان مدل اقتصادی بهینه بدون منبع ذخیره‌کننده انرژی ارائه شده است.

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^r H \times S \times \eta_{sys} \times r_i \times (C \times AR_r \times c_1)}{[cc + \sum L(r_n, s)] + IC^1 \times (1+j)^{zn} + \sum_{i=1}^r (z_r \times ISC \times (1+j)^r)} \quad (30)$$

### ۵-۱- تحلیل اقتصادی مدل

متوسط ساعات آفتابی داده‌های استخراج شده از سازمان هواشناسی با طبقه‌بندی شهر-های ایران در جدول (۲) نشان داده شده، که در نرم افزار spss درج و مدل رگرسیون

<sup>1</sup> Inverter Cost

متوسط شدت تابش در حالت نرمال بدست آمده، سپس با استفاده از رابطه (۱۴) انرژی تولیدی محاسبه شده است، از سویی با استفاده از قیود رابطه (۲۷) و شکل (۲)، فاصله میان دو پنل (D)، زاویه پنل نسبت به سطح افق ( $\beta$ ) و شدت تابش (H) به گونه‌ای تعیین شده است، که اثر سایه روی پنل کاهش و فضای نصب سیستم بهینه و انرژی تولیدی ماکزیمم شده، در نتیجه درآمد حاصل از فروش مجموع انرژی تولیدی  $RES_{PV}$  افزایش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی در حالت بهینه و نرمال در جدول (۵) آمده است.

جدول (۵): نتایج شبیه‌سازی انرژی تولیدی در حالت نرمال و بهینه

شهر	یزد	اهواز	تهران	اردبیل	گرگان
نرمال	متوسط شدت تابش (کیلووات ساعت بر مترمربع)	۴/۴	۴/۴	۴/۲۲	۳/۹۸
	انرژی تولیدی (کیلووات ساعت)	۷۷۲۷	۷۵۵۱	۷۲۴۵	۶۹۸۴
بهینه	متوسط شدت تابش (کیلووات ساعت بر مترمربع)	۴/۶۵	۴/۴	۴/۷	۴/۲۸
	انرژی تولیدی (کیلووات ساعت)	۸۵۸۰	۸۰۳۰	۸۴۹۰	۷۸۱۰

منبع: یافته‌های تحقیق

### ۱-۵- زمان برگشت سرمایه

نتایج شبیه‌سازی مدل ریاضی روابط (۲۹) و (۳۰) در جدول (۶) با نرخ ۱۰۴۰۰ ریال آمده است. نتایج اقتصادی بودن مدل ریاضی رابطه (۲۹) برای چهار شهر یزد، اهواز، اردبیل و گرگان و همچنین شیب برگشت سرمایه در حالت بهینه و کمینه شدن فضای نصب سیستم در این حالت نسبت به حالت نرمال و اقتصادی بودن آن، نشان داده شده است. جدول (۶) نشان می‌دهد هرچند که نصب سیستم فتوولتائیک در شهر گرگان قابلیت برگشت مجموع هزینه‌ها و سرمایه‌گذاری اولیه را دارد، ولی محل مناسبی برای سرمایه‌گذاری نصب سیستم فتوولتائیک با ذخیره‌کننده انرژی نسبت به استان‌های دیگر را با توجه به شرایط تحریم، تورم و میزان ساعات آفتابی سالیانه ندارد. این موضوع برای شهرهای سه استان گیلان، مازندران و گلستان قابل تعمیم می‌باشد. در صورتیکه نرخ تعرفه‌های انرژی مصرف برق از سوی وزارت نیرو واقعی شود آنگاه با توجه به ناپایداری و شرایط جوی محل، نصب سیستم فتوولتائیک برای این شهرها با توجه به مدل ریاضی رابطه (۳۰) اقتصادی خواهد شد. مشترک در این مدل می‌تواند با تامین درصدی از انرژی ذخیره‌کننده براساس ضرورت، هزینه‌ها را کاهش و برگشت سرمایه سریع‌تر صورت

پذیرد. نصب سیستم فتوولتائیک بدون ذخیره کننده انرژی و متصل به شبکه توزیع برق برای محل‌هایی که دارای پایداری، افزایش قابلیت اطمینان و تاثیر خاموشی‌های سالیانه کمتر بر فعالیت‌های مشترک می‌باشد، در این صورت از مدل ریاضی رابطه (۳۰) استفاده می‌شود. نتایج نشان داده شده در جدول (۶)، استفاده از این مدل در کل کشور، اقتصادی و برگشت سرمایه دارای شیب تندتری بخصوص در حالت بهینه می‌باشد.

#### جدول (۶): نتایج شبیه‌سازی رابطه (۲۹) و (۳۰)

تعداد سال برگشت سرمایه برای قدرت ۵ کیلووات									
شرح	پایه فروش انرژی (ریال)	شهر اهواز		شهر یزد		شهر اردبیل		شهر گرگان	
		نرمال	بهینه	نرمال	بهینه	نرمال	بهینه	نرمال	بهینه
سیستم فتولتاپیک با ذخیره کننده انرژی	۱۰۴۰۰	۱۳	۱۲	۱۲	۱۰	۱۳	۱۲	۱۵	۱۴
سیستم فتولتاپیک بدون ذخیره کننده انرژی		۷	۷	۶	۵	۷	۶	۹	۸

منبع: یافته‌های تحقیق

#### ۲-۱-۵- آزمایش مدل

ریزشبکه جریان مستقیم سیستم فتوولتائیک با قدرت ۵ و ۸/۶ کیلووات در محدوده شرکت توزیع نیروی برق تهران بزرگ نصب شده، نتایج با حالت نرمال و بهینه مقایسه شده‌اند. که طبق جداول (۷) و (۸) برگشت سرمایه با حالت نرمال و بهینه شبیه‌سازی شده، نزدیک می‌باشد. در حالت بهینه نتایج تولید انرژی و درآمد حاصل از آن تعمیم داده شده است.

#### جدول (۷): نتایج تست شبیه‌سازی رابطه (۲۹) و (۳۰) و نصب سیستم موجود در

##### شرکت توزیع نیروی برق تهران بزرگ برای توان ۵ کیلووات

تعداد سال برگشت سرمایه برای قدرت ۵ کیلووات					
شرح	پایه فروش انرژی (ریال)	نرمال	بهینه	نصب	
				نرمال	بهینه
سیستم فتولتاپیک با ذخیره کننده انرژی	۱۰۴۰۰	۱۳	۱۱	۱۴	۱۲
سیستم فتولتاپیک بدون ذخیره کننده انرژی		۸	۷	۸	۸

منبع: یافته‌های تحقیق



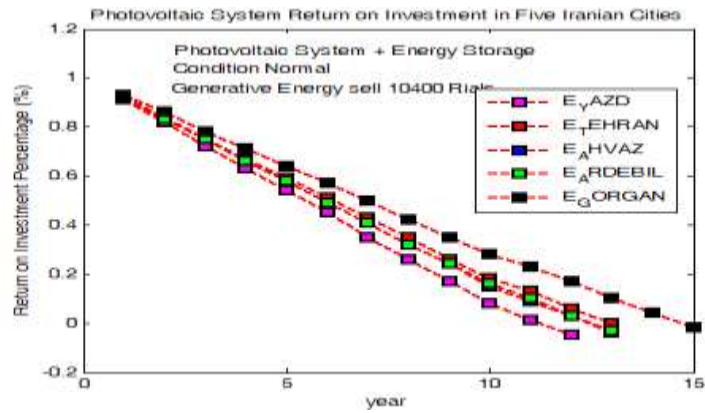
جدول (۸): نتایج تست شبیه‌سازی رابطه (۲۹) و (۳۰) و نصب سیستم موجود در

شرکت توزیع برق تهران بزرگ برای توان ۸/۶ کیلووات

تعداد سال برگشت سرمایه برای قدرت ۸/۶ کیلووات					
شرح	پایه فروش انرژی (ریال)	نرمال	بهینه	نصب	
				نرمال	بهینه
سیستم فتوولتائیک با ذخیره- کننده انرژی	۱۰۴۰۰	۱۴	۱۱	۱۵	۱۳
سیستم فتوولتائیک بدون ذخیره‌کننده انرژی		۸	۷	۸	۷

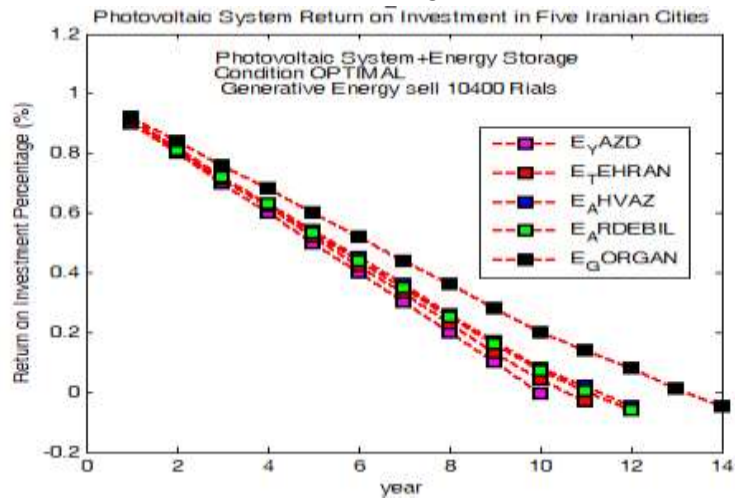
منبع: یافته‌های تحقیق

شکل‌های (۴)، (۵)، (۶) و (۷) درصد برگشت سرمایه سیستم فتوولتائیک با ذخیره‌کننده انرژی و بدون آن مربوط به پنج شهرايران برای قدرت درخواستی پنج کیلووات با نرخ فروش ۱۰۴۰۰ ریال به ازای یک کیلووات ساعت انرژی تولیدی در شرایط نرمال و بهینه و براساس مدل ریاضی روابط (۲۹) و (۳۰) نشان می‌دهد، که مدل ریاضی رابطه (۳۰)، در حالتی که قیمت تعرفه‌های انرژی شبکه توزیع برق با نرخ یارانه‌ای و یا واقعی باشد و دارای قابلیت اطمینان بالایی باشد اقتصادی است و مشترکین با سرمایه‌گذاری در نصب سیستم فتوولتائیک و فروش انرژی ضمن کسب درآمد، انرژی تولیدی را به شبکه تزریق و پایداری شبکه را افزایش می‌دهند. در حالتی که تورم و تحریم اقتصادی افزایش یابد به علت شرائط خاص کشورما، رابطه (۳۰) بازهم اقتصادی می‌باشد. ولی در صورتی که تورم و تحریم دارای شیب افزایشی بسیار زیادی داشته باشد مانند تورم در کشورهای آمریکای جنوبی در این صورت با اصلاح نرخ خرید یا تعدیل انرژی توسط دولت، مدل ریاضی اقتصادی خواهد بود.



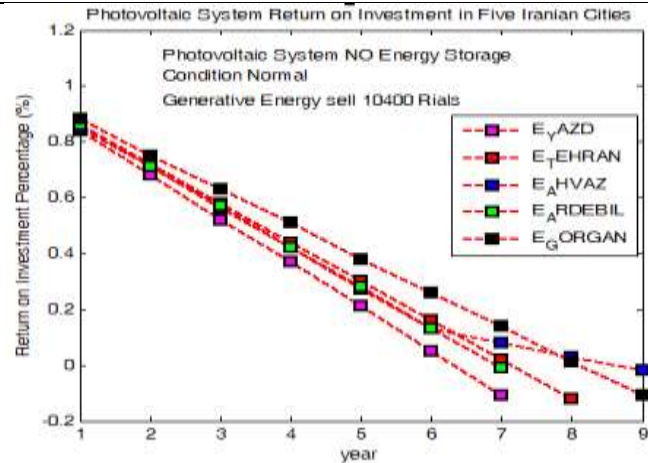
شکل (۴): درصد برگشت سرمایه سیستم با ذخیره‌کننده انرژی در شرایط نرمال

منبع: یافته‌های تحقیق



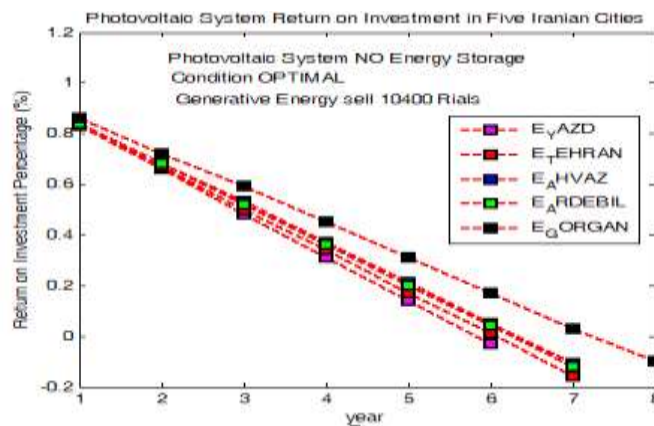
شکل (۶): درصد برگشت سرمایه سیستم با ذخیره‌کننده انرژی در شرایط بهینه

منبع: یافته‌های تحقیق



شکل (۵): درصد برگشت سرمایه سیستم بدون ذخیره‌کننده انرژی در شرایط نرمال

منبع: یافته‌های تحقیق



شکل (۵): درصد برگشت سرمایه سیستم بدون ذخیره‌کننده انرژی در شرایط بهینه

منبع: یافته‌های تحقیق

## ۶- نتیجه‌گیری

ریزشبکه جریان مستقیم فتوولتائیک متصل به شبکه توزیع بخش مهمی از شبکه برق می‌باشند، که تاثیر زیادی بر توسعه و پایداری انرژی در آینده خواهند داشت. اقتصادی کردن سیستم فتوولتائیک می‌تواند باعث افزایش پایداری و آزادسازی ظرفیت شبکه توزیع برق و از سوی سهم بسزایی در حفاظت از محیط‌زیست، شرایط بحرانی دارد. در این پژوهش تمرکز بر مدیریت افزایش انرژی سیستم و بازگشت سرمایه در

کمترین زمان می‌باشد. با استفاده از پارامترهای موجود در سازمان هواشناسی در طی سالیان قبل شامل میزان ساعات آفتابی، رطوبت، دما و ابرناکی، مراکز استان‌ها طبق جدول (۲) در چهارطبقه قرار گرفتند و مدل رگرسیون شدت تابش هر طبقه طبق جدول (۳) بدست آمده است. مدل ریاضی اقتصادی سیستم فتوولتائیک با ذخیره‌کننده انرژی و بدون آن، با توجه به افزایش بهینه تولید انرژی، درآمد حاصل از آن و هزینه‌ها، طبق رابطه (۲۹) و (۳۰) ارائه شده، که سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان می‌توانند با استفاده از نتایج بدست آمده، خط‌مشی آینده کشور را در تولید انرژی ترسیم کنند. در این پژوهش مدل اقتصادی ریزشکه سیستم فتوولتائیک و ارزیابی اقتصادی براساس چرخه هزینه عمر و درآمد حاصل از فروش انرژی تولیدی سیستم در دو حالت نرمال و بهینه و نرخ ۱۰۴۰۰ ریال، با دو سناریو شامل سیستم انرژی ذخیره‌کننده و بدون آن در نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی و نتایج ۵ شهر یزد، تهران، اهواز، اردبیل و گرگان تجزیه و تحلیل شده است. هدف از مدل ریاضی رابطه (۲۹)، ماکزیمم کردن صورت کسر با استفاده از الگوریتم فراابتکاری زنبورعسل و افزایش درآمد حاصل فروش انرژی نسبت به مجموع هزینه‌ها در طول بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری اولیه با ذخیره‌کننده انرژی می‌باشد. در این مدل، درصد هزینه جهت ذخیره‌کننده انرژی وابستگی مستقیم به قابلیت اطمینان شبکه توزیع برق و میزان انرژی ضروری مشترک در زمان ناپایداری شبکه توزیع برق دارد. در صورتیکه ضرورت انرژی مورد نیاز مشترک با قابلیت اطمینان شبکه توزیع مرتفع شده باشد، در این صورت از مدل ریاضی رابطه (۳۰) استفاده می‌شود. زمان برگشت سرمایه در مدل اقتصادی (۳۰) نسبت به مدل (۲۹) دارای شیب تندتری می‌باشد. تاثیر تورم و تحریم در رابطه (۳۰) تاثیر کمتری دارد، در صورتی که نرخ تورم و تحریم شدت زیادی داشته باشد، با سیاست تعدیل کمی از سوی دولت در نرخ خرید انرژی باز هم سیستم اقتصادی خواهد بود. با واقعی شدن نرخ تعرفه‌های برق سیاست مقدار مصرف و انتقال انرژی از سوی مشترک متفاوت خواهد بود، ولی در نتیجه اقتصادی مدل تغییری ایجاد نخواهد کرد. جدول (۵) تولید انرژی سیستم در ۵ شهر کشور و جدول (۶) برگشت سرمایه در حالت نرمال و بهینه با استفاده از مدل (۲۹) و (۳۰) که در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. در حالت بهینه برگشت سرمایه نسبت به حالت نرمال با کمترین فضای نصب، سریعتر صورت می‌گیرد. نتایج جداول (۷) و (۸) سیستم فتوولتائیک منصوبه دو مشترک در شهر تهران، نشان می‌دهد، زمان برگشت سرمایه در حالت بهینه و نرمال، با مدل ارائه شده رابطه (۲۹) و (۳۰) تقریباً مشابه می‌باشند.

### فهرست منابع

- ۱- احمدی، محمد (۱۳۹۳). آمادگی آزمون اصول بازار سرمایه. تهران، انتشارات آریانا قلم.
- ۲- امیر، وحید، عظیمیان، مهدی و حدادیپور، شاپور (۱۳۹۸). بهره‌برداری چند ریزش‌بکه با حامل‌های انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت. هوش محاسباتی در مهندسی برق، ۱۰(۳)، ۶۹-۸۶.
- ۳- برزی، علیرضا، هاشم‌زاده خوراسگانی، غلامرضا، فتحی هفشجانی، کیامرث و علیرضایی، ابوتراب (۱۳۹۸). پارامترهای موثر بر انرژی تولیدی ریزش‌بکه جریان مستقیم سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه توزیع برق ایران با رویکرد پایداری. نشریه انرژی ایران، ۲۲(۴)، ۴۵-۶۸.
- ۴- سازمان هواشناسی ایران.
- ۵- ستاره، محمد و قاسمی، حسن (۱۳۹۴). مدیریت توان در ریزش‌بکه متعادل جزیره-ای با در نظر گرفتن پایداری سیگنال کوچک و پاسخ دینامیکی. مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۲(۱)، ۱-۱۲.
- ۶- صادقی، حسین، آذر، عادل و خاکسار آستانه، سمانه (۱۳۹۴). بهینه‌یابی تأمین منابع انرژی با هدف تولید برق، چشم‌انداز ایران در افق ۱۴۰۴. پژوهش‌های اقتصادی (رشد و توسعه پایدار)، ۱۵(۳)، ۹۱-۱۱۸.
- ۷- قائمی راد، طاهره و کریمی، محمد (۱۳۹۳). ارزیابی و مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی مدل گسترش آتش‌سوزی جنگلی بر مبنای اتوماتای سلولی با استفاده از دو الگوریتم PSO و ABC. مطالعات جغرافیایی، ۲۴(۹۳)، ۶۶-۷۵.
- ۸- قاسمیان فرد، احسان و موسوی راد، سید حامد (۱۳۹۶). برق توزیع نشده در شرکت توزیع نیروی برق شمال استان کرمان: تحلیل پویایی‌های سیستمی. فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی، ۳(۸)، ۱۱۹-۱۴۵.
- ۹- قلی‌نیا، محمد، صفدری، مهران و حسن‌پور، سمیه (۱۳۹۷). طرح روشی نوین در برنامه‌ریزی بهینه کوتاه‌مدت ریزش‌بکه. مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران، ۱۵(۱)، ۳۳-۲۵.
- ۱۰- مولایی، محمدعلی، دهقانی، علی و حسین‌زاده، سمانه (۱۳۹۴). رابطه بین مصرف انرژی و رشد تولید در بنگاه‌های تولیدکننده وسایل حمل‌ونقل ایران (رهیافت علیت

- گرنجر، تودا و یاماماتو و داده‌های تابلویی پویا). *فصلنامه رشد و توسعه اقتصادی*، ۵(۲۵)، ۱۹-۴۰.
- ۱۱- موسوی، عسگریان ایبانه (۱۳۹۶). قیمت‌گذاری برق در شبکه‌های توزیع با هدف کاهش تلفات و آلودگی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات خودتطبیقی. سی و دومین کنفرانس بین‌المللی برق. تهران، ایران.
- ۱۲- مومنی، منصور، نظری، حسام و کاظمی، عالیه (۱۳۹۴). انتخاب سناریوی مناسب برای پیش‌بینی تقاضای انرژی بخش خانگی - تجاری با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات. *فصلنامه اقتصاد مقداری*، ۱۰(۳)، ۱-۱۹.
- ۱۳- وزارت نیرو (۱۳۹۶). سایت دفتر آموزشی، تحقیقات و فناوری "لویت‌های تحقیقاتی".
- ۱۴- وزارت نیرو (۱۳۹۴). دفتر فناوری گروه آمار و اطلاعات، گزارش وضعیت برنامه‌های بخش برق و سیمای آینده.
- ۱۵- وزارت نیرو و شرکت‌های تابعه (شرکت توزیع نیروی برق تهران بزرگ).
- ۱۶- سازمان هواشناسی ایران

- 1- Abdelmaguid, T. F. (2015). A neighborhood search function for flexible job shop scheduling with separable sequence-dependent setup times. *Applied Mathematics and Computation*, 260, 188-203.
- 2- Ahmadi, M. (2015). Preparation for the capital market principles test. Tehran, Ariana Ghalam Publications (In Persian).
- 3- Amir, V., Azimian, M., & Haddadipour, Sh. (2020). Multi-network operation with energy carriers, taking into account uncertainty. *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, 10(3), 69-86 (In Persian).
- 4- Anand, R. S., Das, M. K., Iyer, S. K., Mishra, S. K., Sensarma, P. S., Singh, A., ... & Katiyar, M. (2009). Solar Energy Research Enclave. *Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Kampur*, 208, 016.
- 5- Barzi, A. B., Hashemzadeh Khorasgani, Gh., Fathi Hafshjani, K., & Alirezaei, A. (2020). Parameters affecting the microgrid energy production of direct current photovoltaic system connected to Iran's electricity distribution network with a sustainability approach. *Iranian Journal of Energy*, 22(4), 45-68 (In Persian).
- 6- Cai, C., Liu, H., Dai, W., Deng, Z., Zhang, J., & Deng, L. (2017). Dynamic equivalent modeling of a grid-tied microgrid based on characteristic model and measurement data. *Energies*, 10(12), 1951.
- 7- DoE, U. S. (2015). Quadrennial technology review 2015. *US Department of Energy, Washington, DC*.

- 8- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons.
- 9- Fina, B., Fleischhacker, A., Auer, H., & Lettner, G. (2018). Economic assessment and business models of rooftop photovoltaic systems in multiapartment buildings: case studies for Austria and Germany. *Journal of Renewable Energy*, 2018.
- 10- Ghaemi Rad, T., & Karimi, M. (2015). Evaluating and comparing the results of optimizing the forest fire expansion model based on cellular automation using two algorithms, PSO and ABC. *Geographical Studies*, 24(93), 66-75 (In Persian).
- 11- Ghasemian Fard, E., & Mousavi Rad, S. H. (2018). Unallocated electricity in the North Kerman Electricity Distribution Company: Analysis of system dynamics. *Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research*, 3(8), 119-145 (In Persian).
- 12- Gholinia, M., Safdary, M., & Hasanpour, S. A. (2018). Novel Method for Short-term Micro-Grid Planning. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*.15(1), 25-33 (In Persian)
- 13- Hatefi Einaddin, A., Sadeghi Yazdankhah, A., & Kazemzadeh, R. (2017). Power management in a utility connected micro-grid with multiple renewable energy sources. *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, 5(1), 1-10.
- 14- Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P., & Bansal, R. C. (2017). A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 596-609.
- 15- Kuzlu, M., Pipattanasomporn, M., & Rahman, S. (2012). Hardware demonstration of a home energy management system for demand response applications. *IEEE Transactions on Smart grid*, 3(4), 1704-1711.
- 16- Lee, A. H., Kang, H. Y., & Liou, Y. J. (2017). A hybrid multiple-criteria decision-making approach for photovoltaic solar plant location selection. *Sustainability*, 9(2), 184.
- 17- Molaei, M. A., Dehghani, A., & Hosseinzadeh, S. (2015). Relationship between energy consumption and production growth in Iranian transport companies (Granger, Toda and Yamamoto causality approach and dynamic panel data). *Quarterly Journal of Economic Growth and Development*, 5(25), 19-40 (In Persian).
- 18- Momeni, M., & Nazari, H., & Kazemi, A. (2016). Select the appropriate scenario to predict the energy demand of the household-commercial sector using the particle mass optimization algorithm. *Quantitative Economics Quarterly*, 10(3), 1-19 (In Persian).

- 19- Ntanos, S., Skordoulis, M., Kyriakopoulos, G., Arabatzis, G., Chalikias, M., Galatsidas, S., ... & Katsarou, A. (2018). Renewable energy and economic growth: Evidence from European countries. *Sustainability*, 10(8), 2626.
- 20- Olowu, T. O., Sundararajan, A., Moghaddami, M., & Sarwat, A. I. (2018). Future challenges and mitigation methods for high photovoltaic penetration: A survey. *Energies*, 11(7), 1782.
- 21- Orchi, T. F., Mahmud, M. A., & Oo, A. M. T. (2018). Generalized dynamical modeling of multiple photovoltaic units in a grid-connected system for analyzing dynamic interactions. *Energies*, 11(2), 296.
- 22- Pedrasa, M. A. A., Spooner, T. D., & MacGill, I. F. (2010). Coordinated scheduling of residential distributed energy resources to optimize smart home energy services. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1(2), 134-143.
- 23- Sadeghi, H., Azar, A., & Khaksar Astaneh, S. (2016). Optimizing the supply of energy resources with the aim of generating electricity, Iran's perspective on the horizon of 1404. *Economic Research (Sustainable Growth and Development)*, 15 (3), 91-118 (In Persian).
- 24- Setareh, M., & Ghasemi, H. (2015). Power Management in an Isolated Balanced Microgrid Considering Small Signal Stability and Dynamic Response. *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, 12(1), 1-12 (In Persian).
- 25- Tang, C. F., Tan, B. W., & Ozturk, I. (2016). Energy consumption and economic growth in Vietnam. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1506-1514.
- 26- Torres-Moreno, J. L., Gimenez-Fernandez, A., Perez-Garcia, M., & Rodriguez, F. (2018). Energy management strategy for micro-grids with PV-battery systems and electric vehicles. *Energies*, 11(3), 522.
- 27- Van Der Stelt, S., AlSkaif, T., & van Sark, W. (2018). Techno-economic analysis of household and community energy storage for residential prosumers with smart appliances. *Applied Energy*, 209, 266-276.
- 28- Wright, D. J., Badruddin, S., & Robertson-Gillis, C. (2018). Micro-tracked CPV can Be cost competitive with PV in behind-the-meter applications with demand charges. *Frontiers in Energy Research*, 6, 97.
- 29- Yeshalem, M. T., & Khan, B. (2017). Design of an off-grid hybrid PV/wind power system for remote mobile base station: A case study. *Aims Energy*, 5(1), 96-112.
- 30- Zsiborács, H., Hegedűsné Baranyai, N., Csányi, S., Vincze, A., & Pintér, G. (2019). Economic analysis of grid-connected PV system regulations: A hungarian case study. *Electronics*, 8(2), 149.
- 31- Zinaman, Owen, Mackay Miller, Ali Adil, Douglas Arent, Jaquelin Cochran, Ravi Vora, Sonia Aggarwal et al. *Power systems of the future: a 21st century power partnership thought leadership report*. No. NREL/TP-6A20-62611. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2015.